
CHINA ELECTRICAL

中国电气 工程大典

ENGINEERING CANON

中国电气工程大典编辑委员会

第 **11** 卷

配电工程

主编 陆俭国 何瑞华 陈德桂 仲明振



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

《中国电气工程大典》是由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会共同组织全国电气工程各领域的著名专家、学者编纂而成的。它是一部全面系统反映电气工程各领域最新成就和技术水平的综合性工具书。《中国电气工程大典》包括现代电气工程基础、电力电子技术、电气工程材料及器件、火力发电工程、水力发电工程、核能发电工程、可再生能源发电工程、电力系统工程、电机工程、输变电工程、配电工程、船舶电气工程、交通电气工程、建筑电气工程、电气传动自动化等15卷。

本书为第11卷，配电工程卷。主要内容包括概论、低压电器、低压成套开关设备和控制设备、低压电器与成套设备可靠性技术、低压电器试验与检测技术，以及低压成套开关设备和控制设备试验与检测技术。

本书主要供电气工程领域技术人员和管理人员使用，也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国电气工程大典. 第11卷, 配电工程 / 陆俭国等主编; 中国电气工程大典编辑委员会编. —北京: 中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-7834-3

I. 中… II. ①陆…②中… III. ①电气工程-中国②配电系统-电力工程-中国 IV. TM TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 138910 号

中国电力出版社出版发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 2 月第 1 版 2009 年 2 月北京第 1 次印刷

880mm×1230mm 1/16 • 60.75 印张 • 2716 千字 • 2 插页

定价 220.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

中国电气工程大典

编辑委员会

- 主任：陆燕荪 原机械工业部副部长、教授级高级工程师
中国机械工程学会名誉理事长
- 陆延昌 原电力工业部副部长、教授级高级工程师
中国电机工程学会理事长
- 执行主任：周鹤良 原机械工业部电工局局长、教授级高级工程师
中国电工技术学会名誉理事长
- 宋天虎 原机械工业部科技司司长、教授级高级工程师
中国机械工程学会常务副理事长
- 副主任：潘崇义 中国电工技术学会副理事长、教授级高级工程师
- 吴玉生 中国电机工程学会秘书长、教授级高级工程师
- 邴凤山 中国水力发电工程学会副理事长、教授级高级工程师
- 严宏强 中国动力工程学会秘书长、教授级高级工程师
- 宗 健 中国电力出版社有限公司董事长、总经理、编审

委 员：（按姓氏笔画排列）

丁 杰	卜广全	于 龙	于坤山	于 明	于新颖	马小亮	马文忠	马伟明	马伟斌
马旭东	马济泉	马晓茜	马隆龙	丰镇平	王之杰	王为民	王正鸣	王占奎	王永骥
王成山	王兆安	王志峰	王作民	王国海	王明渝	王金元	王学伟	王泽忠	王建生
王建华	王绍武	王春华	王厚余	王炳忠	王 勇	王素英	王振铭	王 乘	王维洲
王景芹	王 强	王锡凡	王新新	王黎明	王德宽	王赞基	文习山	文劲宇	方晓燕
方 磊	尹天文	邓长胜	孔 力	孔伯汉	孔昭年	石萍萍	卢 强	卢澎湖	叶奇蓁
田东强	田培斌	史进渊	史毓珍	白少林	白俊光	白晓民	白继彬	冯江华	司马文霞
邢馥吏	戎一农	吕征宇	吕鸿达	朱庆明	朱英浩	朱宝田	朱晓明	朱家驹	朱耀泉
仲明振	任兆宏	任修明	任俊生	危师让	郭 雄	刘大明	刘广峰	刘卫宁	刘友梅
刘公直	刘文华	刘平安	刘 伟	刘仲儒	刘希清	刘 杰	刘尚明	刘国林	刘泽洪
刘建飞	刘建明	刘屏周	刘璞岩	刘德志	齐剑波	关志成	江秀臣	江哲生	池 涌
汤 涌	汤蕴林	祁恩兰	许江宁	许忠卿	许洪华	阮江军	阮新波	阮 毅	孙才新
孙凤杰	孙成群	孙 林	孙牧海	严宏强	严陆光	严俊杰	严 萍	苏秀革	杜正春
杜毅威	杨玉岗	杨守权	杨寿敏	杨其国	杨奇逊	杨奇娟	杨怡元	杨俊智	杨 耕
杨维迅	杨 雯	杨道刚	杨德才	李 卫	李文健	李永东	李成榕	李 旭	李兴源
李安定	李 农	李若梅	李杰仁	李宝树	李定中	李 奎	李彦明	李晓明	李颂哲
李朗如	李培植	李盛涛	李崇坚	李道本	李道林	李 鹏	李 新	李肇林	李耀星
邴凤山	肖立业	肖昌汉	肖辉乾	肖湘宁	肖耀荣	吴正国	吴创之	吴运东	吴志坚
吴国平	吴质根	吴晓波	吴培豪	邱爱慈	何木云	何阿平	何金良	何梓年	何湘宁
何瑞华	佟为明	余 志	余贻鑫	邹云屏	邹金昌	邹孟奇	应百川	辛德培	辛耀中
汪继强	汪集昶	汪樨生	汪德良	沈小宇	沈 江	沈 兵	沈邱农	沈梁伟	宋文武
宋汉武	宋哲仁	迟 速	张艺滨	张文才	张玉花	张业广	张乔根	张仲超	张兆鹤
张伯明	张冶文	张启平	张 波	张 亮	张洪钟	张祖平	张勇传	张晓江	张晓锋
张 敏	张 望	张景洲	陆永平	陆宠惠	陆俭国	陆剑秋	陆祖良	陆家榆	陆嘉明
陈汉民	陈伟根	陈 仲	陈众励	陈庆国	陈 坚	陈伯时	陈国柱	陈治明	陈建飏
陈 星	陈思铨	陈 勇	陈哲良	陈恩鉴	陈雪梅	陈清泉	陈超志	陈敬超	陈辉明
陈黎平	陈德昌	陈德胜	陈德桂	邵 岚	苟锐锋	林云生	林公舒	林集明	易学勤
罗永浩	罗景华	金如麟	周小谦	周以国	周双喜	周 平	周仲仁	周远翔	周孝信
周建中	周思刚	周家启	周 娟	周锡生	郑小康	郑云之	郑永红	郑克文	郑明光
宗建华	宓传龙	孟庆东	赵玉文	赵光宙	赵 伟	赵红一	赵昌宗	赵治华	赵宗让
赵荣祥	赵相宾	赵 洁	赵 敏	赵婉君	赵 琨	赵 毅	赵黛青	荣命哲	胡方荪



胡安	胡学浩	胡振岭	胡鉴清	段善旭	段献忠	侯子良	俞忠德	俞智斌	饶芳权
施国	施鹏飞	洪元颐	姚本荣	姚尔昶	姚家祎	姚福生	贺建华	贺益康	贺湘琨
贺德馨	骆仲决	秦和	秦裕碧	袁余军	袁建生	袁建敏	都兴有	耿英三	莫会成
贾东旭	夏立	夏祥贵	顾四行	顾国彪	钱昌燕	钱宝良	钱照明	倪维斗	徐元辉
徐凤刚	徐永法	徐兆丰	徐国政	徐洪海	徐殿国	徐铄	徐德鸿	殷禄祺	奚大华
高子瑜	高文胜	高庆国	高京生	高理迎	高培庆	郭天兴	郭国顺	郭保良	郭洁
郭振岩	郭灏	唐任远	唐炬	唐春潮	陶星明	黄少锋	黄仁乐	黄妙庆	黄其励
黄国治	黄学清	黄宝生	黄晓丽	黄崇祺	黄景湖	梅生伟	曹一家	曹惠彬	戚庆成
崔志强	崔翔	康勇	章名耀	章定邦	梁维宏	梁维燕	梁曦东	彭宗仁	葛大麟
葛少云	葛诗慧	葛蓉生	葛溪亭	葛增茂	董卫国	蒋洪德	蒋善定	韩民晓	韩英铎
惠世恩	覃大清	程天麟	程均培	程时杰	程树康	程浩忠	傅书遏	焦依	焦树建
舒惠芬	曾文星	曾正中	曾明富	曾南超	曾雁鸿	曾嵘	游亚戈	谢开贵	谢秋野
雷银照	雷清泉	满慧文	蔡崇积	管瑞良	廖胜松	廖瑞金	缪鸿兴	黎晓晖	颜渝坪
薛以太	戴先中	戴庆忠	戴慧珠	魏光辉					

序

电气工程包括发电工程、输配电工程和用电工程，是为国民经济发展提供电力能源及其装备的战略性产业，是国家工业化和国防现代化的重要技术支撑，是国家在世界经济发展中保持自主地位的关键产业之一。电气工程的产业关联度高，对从原材料工业、机械制造业、装备工业以及电子、信息等一系列产业的发展均具有推动和带动作用，对提高整个国民经济效益，促进经济社会可持续发展，提高人民生活质量有显著影响。

经过改革开放 30 年来的发展，我国电气工程已经形成了较完整的科研、设计、制造、建设、运行体系，成为世界电力工业大国之一。至 2007 年底，我国发电装机容量达 7.13 亿 kW，三峡水电及输变电工程、百万千瓦级超超临界火电工程、百万千瓦级核电工程，以及正在建设的交流 1000kV、直流 ± 800 kV 特高压输变电工程等举世瞩目；大电网安全稳定控制技术、新型输电技术的推广，大容量电力电子技术的研究和应用，风力发电、太阳能光伏发电等可再生能源发电技术的产业化及规模化应用，超导电工技术、脉冲功率技术、各类电工新材料的探索与应用取得重要进展。特别是进入 21 世纪以来，电气工程领域全面贯彻科学发展观，新原理、新技术、新产品、新工艺获得广泛应用，拥有了一批具有自主知识产权的科技成果和产品，自主创新已成为行业的主旋律。我们的电气工程技术和产品，在满足国内市场需求的基础上已经开始走向世界。

电气工程技术的快速发展和巨大成就，要求对原有知识的不断更新，广大电气工程领域的工作者们对新的知识愈加渴求。在原机械工业部陆燕荪、电力工业部陆延昌两位老部长的倡议和领导下，由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个全国性学会，联合组织了电气工程各领域近 2000 位专家和学者，历





时4年多，编撰的《中国电气工程大典》现在出版了。这套内容新颖实用的巨著是电气工程领域一项重要的基础性工作，也是我国电气工程技术人员对社会的一项公益性奉献。这部鸿篇巨著不仅具有电气工程技术的知识魅力，同时也具有鲜明的时代特色，相信会为广大读者营造一个开卷有益的氛围。

电能作为目前使用最方便的二次能源，在推动社会进步、促进科学技术发展和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。随着社会的不断进步和人民生活水平的不断提高，电气工程任重而道远，需要依靠科技进步，并用更新的科学知识武装每一位电气工作者，所以，希望这套著作能对电气工程的教学、科研、设计和管理人员有所裨益。

徐匡迪

二〇〇八年八月十二日



前 言

电的产生和应用是人类有史以来最伟大的科学技术成就之一。电力作为目前最清洁和使用最方便的二次能源，在推动社会发展、促进科学技术进步和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。一个多世纪以来，电气技术的不断发展，电力生产及应用的日益增长，迅速改变了人类社会的面貌，也深深影响着人们的生活方式。电气化的程度已成为国家文明程度的重要标志之一。

改革开放 30 年来，我国科学技术取得了突飞猛进的发展，科技创新已成为国家发展的重要战略。在电气工程领域，新原理、新技术、新工艺、新材料得到了广泛应用，涌现出一大批具有自主知识产权的科研成果和产品。三峡电站的建设，大容量高效清洁超临界和超超临界压力机组的迅速发展，特高压交直流输电技术和灵活交流输电技术的发展和应用，先进的核能发电厂及可再生能源发电厂的成功建造，大电网智能化动态稳定监控系统与信息管理系统的应用，具有先进水平的电气装备制造业的高速发展，大容量电能变换与节能节电技术，风力发电、太阳能光伏发电等资源节约、环境友好的新技术的大量应用，计算机和信息网络技术在电气领域的普及，明显改变着电气工程领域技术发展状况。超导电工技术、脉冲功率技术，纳米材料、永磁材料、有机硅材料等各类电工新技术和新材料的探索与应用，都充分展示了中国电气工程领域所取得的骄人业绩，引起了世界的高度关注。其中许多科研成果和产品，已达到国际先进水平。

电气工程从业人员多，涉及面广，技术进步快，科研成果多，许多科研成果需要总结和积累，许多新的知识需要普及和传播。盛世修典，素有遗风。为反映电气工程领域最新的发展成就，总结已有的科研成果，传播工程领域最新的科学技术知识，中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个学会，联合组织了电气工程各领域的约 2000 位专家和学者，编撰了《中国电气工程大典》。

本套书的编写工作于 2004 年开始启动，编委会多次召开工作会议，精心组织，按照“取材突出新原理、新技术、新工艺、新材料；内容体现新颖性、先进性、实用性；表达力求简明扼要、深入浅出、直观易懂”的原则，反复讨论并修改编写大纲，确定编写内容。经过 4 年磨砺，数易其稿，终于付梓出版。《中国电气工程大典》共 15 卷约 5000 万字，包括《现代电气工程基础》、《电力电子技术》、《电气工程材料及器件》、《火力发电工程》、《水力发电工程》、《核能发电工程》、《可再生能源发电工程》、《电力系统工程》、《电机工程》、《输变电工程》、《配电工程》、《船舶电气工程》、《交通电气工程》、《建筑电气工程》和《电气传动自动化》。

所有组织者和编著者都把编撰本套书当作电气工程领域建设的一项重要的基础性工作，他们认真负责，辛勤耕耘，倾注了大量心血。本套书在编写出版过程中，得到参与编写的各科研院所、企业、高等院校等单位的大力支持，还得到业内有关院士和专家、学者的热心帮助。正是大家的积极参与和无私奉献，才使得这部大典能顺利编写出版，编委会对他们的奉献和支持表示衷心感谢。

这部鸿篇巨著，涉及电气工程设计制造、建设施工、生产运行、科研教学、工程管理等领域，总结了改革开放 30 年来电气工程各领域的技术发展与成功经验，展示了各专业领域的最新技术数据、设计经验、科技成果和发展动态，汇集了国内外相关的先进理念和成熟经验，体现了科学性、先进性和实用性的结合，是一套可供电气工程领域专业技术人员和管理人员使用的综合性工具书，也可供高等院校相关专业师生参考。

《中国电气工程大典》的编撰出版工作涉及面广，参与人员多，写作难度大。尽管编撰人员尽心尽力，倾注了无数心血，但书中难免存在缺点和不足之处，恳请读者指正。

中国电气工程大典编辑委员会主任

陆燕荪 陆延昌

本 卷 前 言

随着国民经济的迅速发展,我国电力工业也得到了迅速发展,到2007年底发电装机容量已达7.13亿kW,建成了三峡水电站,完成了城市和农村电网改造等许多重大项目。近些年来,大容量远距离交直流输电技术、电网安全稳定运行技术、配电与用电技术等新技术在电力系统领域内得到了广泛应用,不仅使我国电力系统的规模不断扩大,同时也使我国电力系统的安全性、稳定性与可靠性不断提高。

低压配电系统是电力系统的一个重要组成部分,它是指电压等级为低压(交流1000V、直流1500V以下)的配电系统。本卷(《配电工程》)是《中国电气工程大典》的第11卷,主要阐述低压配电系统中关键设备(即低压电器与低压成套设备)的最新技术参数和图表,以及先进实用的科研成果、设计经验与发展趋势,还阐述了它们的可靠性技术与试验检测技术等新技术。

本卷共分6篇。由河北工业大学、上海电器科学研究所(集团)有限公司、西安交通大学、天津电气传动设计研究所等单位负责组织编写,由陆俭国、何瑞华、陈德桂、仲明振担任主编,数十位参编作者都是经过精心挑选的本领域的专家,编写提纲由本卷作者多次讨论修改,并征求其他卷作者意见后最终经编委会审查,力争集思广益,力求做到“内容新颖、实用便查”。全书历时三年完稿,其结构如下:

第1篇 概论(主编:仲明振、郭保良、陆俭国)

第2篇 低压电器(主编:何瑞华、尹天文、陈德桂、刘常生、唐春潮)

第3篇 低压成套开关设备和控制设备(主编:陈雪梅、郭保良、程玉标、滕文、张卫东)

第4篇 低压电器与成套设备可靠性技术(主编:王景芹、苏秀苹、高天乐、潘伟杰、郑建荣、马传兴、黄立军、王振宇)

第5篇 低压电器试验与检测技术（主编：李奎、陆俭国、胡德霖、马玉泰、居大伟、林黎明、武一、南寅）

第6篇 低压成套开关设备和控制设备试验与检测技术（主编：陈雪梅、林立功、刘辉、龙静、邢合萍、吴晓龙）

本卷的编写工作始终在大典编委会的组织 and 指导下进行。编写、审阅工作在本卷各位主编、全体编写人员与审稿人员的共同努力下顺利完成。编审过程中得到编审人员所在单位的大力支持和帮助，在此谨向各参编单位和全体编审人员表示诚挚的谢意。

由于编写时间和作者水平所限，书中的不当之处，恳请读者批评指正。

陆俭国 陈德桂 何瑞华 仲明振

中国电气工程大典

第Ⅺ卷

配电工程

编辑出版人员名单

责任编辑 莫冰莹 郭丽然 畅舒 刘亚南

刘利军 马琳 穆智勇 杨易

复审人员 张运东 贾玉兰

封面设计 郑小平

版式设计 张秋雁

责任校对 罗凤贤 朱丽芳 王开云

责任印制 甄茁

目 录

序	
前言	
本卷前言	
第1篇 概论	3
1 低压配电工程与低压配电系统	3
1.1 低压电网结构	3
1.2 低压电网的基本数据	3
1.3 低压电网的总体设计简介	4
1.4 主开关设备、分支配电设备和控制设备	4
1.5 智能化配电系统	5
2 本卷主要内容	5
2.1 低压电器主要内容	5
2.2 低压成套开关设备和控制设备主要内容	5
2.3 低压电器与成套设备可靠性 技术的主要内容	6
2.4 低压电器试验与检测技术的主要内容	7
2.5 低压成套开关设备和控制设备试验与 检测技术的主要内容	7
3 低压配电工程的发展展望	7
3.1 低压电器的发展展望	7
3.2 低压成套开关设备和控制设备发展展望	7
参考文献	9
第2篇 低压电器	11
第1章 综述	13
1 低压电器用途与分类	13
1.1 低压电器定义与范围	13
1.2 低压电器分类与用途	13
2 低压电器主要特征	14
2.1 低压电器基本特征	14
2.2 配电电器主要特征	14
2.3 控制电器主要特征	14
2.4 终端电器主要特征	15
2.5 低压电器型号含义及其唯一性	15
3 我国低压电器产品现状	15
3.1 我国低压电器产品总体情况与技术特征	15
3.2 我国新型低压电器发展与应用	16
4 低压电器发展动向	16
4.1 低压电器现代研发技术	16
4.2 低压电器产品相关新技术	17
4.3 我国低压电器产品发展动向	19
第2章 低压电器基本理论	21
1 电弧理论	21
1.1 电弧的物理基础	21
1.2 电弧的产生	21
2 电接触理论	21
2.1 收缩电阻	21
2.2 表面膜对收缩电阻和接触电阻的影响	23
2.3 α 斑点的稳态热效应	25
3 电器发热	26
3.1 允许温度	26
3.2 热的产生	26
3.3 传热方式	27
3.4 长期工作发热	29
3.5 短路电流下的发热和热稳定性	30
4 电动力	31
4.1 电动力现象	31
4.2 动稳定性	31
4.3 电动力方向	31
4.4 典型导体电动力计算	31
4.5 三相电流电动力	33
5 低压电器电磁系统理论与计算	34
5.1 磁路分析与计算	34
5.2 电磁系统吸力特性计算	38
5.3 电磁系统动态特性的分析计算	40
5.4 电磁铁的工程设计方法	40
第3章 低压开关电器的开断过程与开关电弧	43
1 低压断路器的分断性能与开断过程分析	43
1.1 低压断路器的分断性能	43
1.2 塑壳限流断路器的开断过程	44
2 电弧停滞时间	45
2.1 电弧停滞时间的定义与对电器 开断性能的影响	45
2.2 电弧停滞现象的机理	46
2.3 影响电弧停滞时间的各种因素	46
2.4 电弧从触头到弧角的转移	48
3 磁吹和气吹对电弧的冷却和驱动作用	49
3.1 断路器触头系统的自励磁场	49
3.2 气吹对电弧的冷却和驱动作用	50
4 电弧进入灭弧栅片后的背后击穿现象	52
4.1 电弧的背后击穿现象的电路模型	52
4.2 背后通道热击穿条件分析	53
4.3 消除和减弱背后击穿现象的方法和措施	54
5 电弧电流过零后的介质恢复与重燃现象	54
5.1 两种重击穿现象	54
5.2 介质恢复强度的测量方法	55
5.3 不同开断电流和栅片厚度的介质恢复 和重燃过程	56
5.4 产气材料与灭弧室出气口尺寸对介质 恢复过程的影响	57
6 开关电弧的现代测试技术与灭弧室的 优化设计	58
6.1 低压灭弧系统研发新技术	58
6.2 单频振荡回路和各种传感器	58
6.3 灭弧室内电弧运动的测量	59
6.4 电极与灭弧室栅片间距离优化选择	60
6.5 用引弧板改进灭弧室的开断性能	60
第4章 低压电器的虚拟样机技术	62
1 概述	62
1.1 虚拟样机技术的概念	62
1.2 虚拟样机技术在低压电器中的应用	62

2 三维造型与 CAD 软件	63	7.5 机电寿命	126
2.1 AutoCAD 系统和 UG 系统	63	7.6 智能控制器	126
2.2 其他三维软件的简要介绍	64	7.7 常用交流断路器	126
3 常用仿真软件	64	第 6 章 自动转换开关电器	133
3.1 三维综合仿真软件 ANSYS	64	1 概述	133
3.2 多体动力学仿真软件 Adsms	66	1.1 ATSE 标准	133
4 电磁脱扣器与热脱扣器保护特性的计算	67	1.2 国内外 ATSE 产品情况简介	133
4.1 概述	67	2 结构与工作原理	133
4.2 电磁脱扣器保护特性的仿真	68	2.1 ATSE 的分类	133
4.3 磁脱扣器保护特性分析	70	2.2 开关结构特点与工作原理	134
4.4 热脱扣器保护特性的等效热路 计算方法	71	2.3 控制器基本结构与工作原理	135
4.5 热脱扣器反时限保护特性的计算	71	2.4 可通信控制器	135
5 断路器机构动态特性的仿真与优化设计	73	3 主要产品技术参数与性能	135
5.1 低压塑壳断路器机构动态特性仿真分析	73	3.1 GE-Zenith 系列产品主要技术参数与性能	135
5.2 低压塑壳断路器机构优化设计	74	3.2 TP1 系列产品主要技术参数与性能	136
6 断路器的电动斥力和气动斥力	76	3.3 TBBQ3 系列产品主要技术参数与性能	137
6.1 电动斥力的数值分析方法	76	3.4 WTS 系列产品主要技术参数与性能	137
6.2 气动斥力的实验与计算	77	3.5 WATS 系列产品主要技术参数与性能	138
6.3 塑壳断路器 (MCCB) 电动斥力计算 及其应用	79	4 设计要点	139
6.4 万能式断路器 (ACB) 电动斥力计算 及电力补偿	81	4.1 PC 型 ATSE 设计要点	139
第 5 章 低压断路器	83	4.2 CB 型 ATSE 设计要点	139
1 概述	83	4.3 控制器设计要点	139
1.1 用途	83	5 选用与维修	140
1.2 分类	83	5.1 PC 型 ATSE 选用要点	140
2 断路器的动作原理	84	5.2 CB 型 ATSE 选用要点	141
2.1 断路器结构组成	84	5.3 由接触器派生的 ATSE 选用要点	141
2.2 一般断路器的动作原理	85	5.4 消防泵控制器中选用 ATSE 的原则	141
2.3 直流快速断路器的动作原理	86	第 7 章 低压开关、隔离器、隔离开关、 熔断器组合电器	142
2.4 限流式断路器的动作原理	87	1 产品分类与用途	142
2.5 真空断路器	88	1.1 用途	142
3 主要产品技术性能和参数	88	1.2 定义	142
3.1 断路器的主要性能	88	1.3 符合标准	142
3.2 典型断路器的技术参数	89	1.4 产品分类	142
4 断路器设计要点	109	2 结构特点及工作原理	143
4.1 设计程序	109	2.1 低压隔离器结构特点及工作原理	143
4.2 结构选型	109	2.2 低压开关结构特点及工作原理	144
4.3 触头系统设计要点	109	2.3 低压隔离开关结构特点及工作原理	145
4.4 灭弧室设计要点	111	2.4 低压隔离器熔断器组结构特点及工作原理	145
4.5 过电流脱扣器	112	2.5 低压开关熔断器组结构特点及工作原理	145
4.6 机构	120	2.6 低压隔离开关熔断器组结构特点及 工作原理	146
4.7 抽屉座	121	2.7 低压熔断器式隔离器结构特点及工作原理	147
5 选用	121	2.8 低压熔断器式开关结构特点及工作原理	147
5.1 交流断路器的选用	122	2.9 低压熔断器式隔离开关结构特点及 工作原理	147
5.2 直流断路器的选用	123	3 产品技术参数与性能	148
5.3 交流断路器选用举例	124	3.1 低压隔离器典型产品技术参数与性能	148
6 维修	125	3.2 低压开关典型产品技术参数与性能	150
6.1 维护	125	3.3 低压隔离开关典型产品技术 参数与性能	151
6.2 修理	125	3.4 低压开关熔断器组典型产品 技术参数与性能	156
7 断路器发展趋向	126	3.5 低压隔离开关熔断器组典型 产品技术参数与性能	158
7.1 短路分断能力	126	3.6 熔断器式隔离器典型产品技术	
7.2 短时耐受电流	126		
7.3 壳架等级	126		
7.4 外形尺寸	126		

参数与性能	160	8 电弧故障断路器	210
3.7 熔断器式开关典型产品技术		8.1 发展概况	210
参数和性能	161	8.2 电弧故障的类型和特征	210
3.8 熔断器式隔离开关典型产品		8.3 与过电流保护和剩余电流动作	
技术参数与性能	162	保护装置的比较	211
4 设计要点	165	8.4 发展前景	211
4.1 总体设计	165	9 国内部分电气设备制造商生产的剩余	
4.2 绝缘选择	165	电流动作保护电器及其主要技术参数	211
4.3 导电结构	165	第10章 接触器和起动器	221
4.4 机械机构	166	1 用途与分类	221
4.5 安装方式及接线方式	166	1.1 用途	221
4.6 附件	166	1.2 分类	222
5 选用与维护	166	2 电磁接触器的结构型式及组成部件	223
5.1 选用	166	2.1 电磁接触器的结构原理概述	223
5.2 维护	167	2.2 触头	224
第8章 低压熔断器	168	2.3 灭弧系统	224
1 低压熔断器的用途和分类	168	2.4 电磁系统	225
2 低压熔断器结构与开断电流的工作原理	168	2.5 反力弹簧	226
2.1 低压熔断器的结构	168	2.6 支撑和壳体	227
2.2 熔断器开断电流的工作原理	169	2.7 附件	227
3 熔断器的基本参数和性能	169	2.8 常用接触器的结构特点	227
4 低压熔断器的设计要点	172	3 起动器的结构型式及组成部件	228
4.1 概述	172	3.1 电动机的起动方式	228
4.2 熔体的形状和尺寸的确定	172	3.2 电磁起动器的结构型式	229
5 低压熔断器的选用	176	3.3 过载保护继电器	229
5.1 低压高分断能力熔断器	176	3.4 起动器的外壳	231
5.2 半导体设备保护用熔断器	177	3.5 起动器的附件	231
第9章 剩余电流动作保护电器	178	3.6 起动器的起动特性比较	231
1 剩余电流动作保护电器及其工作原理	178	4 主要技术参数与性能	231
1.1 剩余电流动作保护电器概况	178	4.1 接触器的技术参数与性能	231
1.2 工作原理	178	4.2 起动器的技术参数与性能	236
2 剩余电流动作保护电器主要部件及其结构	180	5 设计要点	237
2.1 剩余电流互感器	180	5.1 电磁接触器的设计要点	237
2.2 剩余电流脱扣器	181	5.2 电磁起动器的设计要点	240
2.3 电子信号放大装置	182	6 选用与维护	240
2.4 执行元件	184	6.1 接触器的选用	241
3 主要技术参数和特性及分类	184	6.2 起动器的选用	244
3.1 剩余电流动作保护电器的主要		6.3 接触器与起动器常用的电气控制电路	245
技术参数和特性	184	7 其他品种的接触器	247
3.2 分类	188	7.1 智能接触器	247
4 剩余电流动作保护电器的功能及应用方式	193	7.2 直流接触器	248
4.1 剩余电流动作保护电器的用途	193	7.3 真空接触器	249
4.2 剩余电流动作保护电器的分级保护方式	196	7.4 固态接触器	250
5 剩余电流动作保护电器的选用和安装	198	8 发展趋向	251
5.1 剩余电流动作保护电器的选用	198	8.1 接触器的发展趋向	251
5.2 剩余电流动作保护电器的安装	199	8.2 起动器的发展趋向	251
5.3 剩余电流动作保护电器误动作原因分析	201	第11章 电动机软起动器	252
5.4 剩余电流动作保护电器动作后的故障查找	203	1 前言	252
6 剩余电流动作保护电器的设计要点	203	1.1 软起动器的定义和适用标准	252
6.1 剩余电流互感器设计要点	203	1.2 异步电动机的转矩、电流与	
6.2 剩余电流脱扣器的设计要点	205	转速的关系	252
6.3 电子式剩余电流动作保护电器的设计要点	207	1.3 异步电动机直接起动存在的	
7 剩余电流动作保护电器的发展方向	208	问题及解决方法	252
7.1 B型剩余电流动作保护电器的发展	208	1.4 软起动器的分类	254
7.2 剩余电流动作保护电器的功能扩展	210	2 软起动器结构与工作原理	256
7.3 剩余电流动作保护电器的可靠性研究	210	2.1 软起动器的基本电路结构	256

2.2 单相交流调压电路原理	256	技术参数	290
2.3 三相交流调压电路原理	257	2.1 小断路器类的产品系列	290
2.4 晶闸管三相交流调压电路的接线方案	260	2.2 剩余电流动作断路器	291
2.5 中点控制的三相调压电路	261	2.3 熔断器组合电器	292
3 软起动器的运行和保护功能	261	2.4 模数化终端组合电器	293
3.1 软起动器对电动机的起动控制	261	2.5 终端电器其他类产品	294
3.2 软起动器的运行控制	263	2.6 国外在我国的主要厂商和主要产品	294
3.3 软起动器的停机控制	264	3 选用	296
3.4 软起动器的保护监控功能	265	3.1 小断路器的选用	296
4 软起动器的主要技术参数和设计要点	266	3.2 配电系统和保护装置	301
4.1 软起动器的主要技术参数	266	3.3 剩余电流动作保护电器的选用	303
4.2 软起动器的工作环境	267	3.4 熔断体保护的选用	306
4.3 软起动器的设计要点	267	3.5 RT30 与 RT14 的差别及各自 适用的场所	307
5 软起动器的应用、维护及其选择	268	3.6 HG30 与 HH30 的差别及各自 适用的场所	309
5.1 软起动器的应用和维护	268	3.7 选小断路器还是选熔断体作保护	309
5.2 如何选择软起动器	268	3.8 模数化终端组合电器的选用	309
第 12 章 控制与保护开关电器	269	3.9 现代建筑电气设计实例	311
1 控制与保护开关电器 (CPS) 的概念	269	4 终端电器的发展动向	312
1.1 控制与保护开关电器的概念	269	4.1 小型断路器 (MCB) 的发展	312
1.2 分类	270	4.2 剩余电流断路器 RCCB 与 RCBO 的发展	313
1.3 CPS 的主要特点	271	4.3 终端组合电器的发展	313
1.4 CPS 的用途	271	第 14 章 电涌保护器 (SPD)	314
2 名词术语、结构与工作原理	271	1 电涌保护器概述	314
2.1 名词术语	271	1.1 信息化催生的新电器——电 涌保护器 (SPD)	314
2.2 结构	271	1.2 电涌保护器的基本功能	314
2.3 工作原理	272	1.3 SPD 的产品特点	315
3 主要技术参数与性能	273	2 SPD 的主要功能元件	315
3.1 技术参数	273	2.1 压敏电阻器 (MOV)	316
3.2 结构和性能要求	275	2.2 气体放电管 (GDT)	319
3.3 派生功能与特殊用途	278	3 低压配电系统用 SPD	320
3.4 典型产品的技术性能 (国内外主要厂商 控制与保护开关电器产品性能特点对照) ...	281	3.1 电源用 SPD 的类型	320
4 设计要点	282	3.2 模数化 SPD 模块的结构	321
4.1 设计程序	282	3.3 电源用 SPD 的安全性	322
4.2 独立结构形式 (一体化) CPS 的设计	282	3.4 SPD 中电压限制元件的组合	323
5 选用与维护	285	3.5 大放电能力的空气间隙 SPD	325
5.1 CPS 的选用	285	3.6 低压配电系统中 SPD 的配置	326
5.2 CPS 的适用范围与典型用途	285	3.7 性能参数和典型产品	328
5.3 维护	286	3.8 产品选型和安装使用	330
6 发展趋向	287	4 信号用 SPD	333
6.1 保护功能更完善	287	4.1 信号用 SPD 的特点和类别	333
6.2 定值整定功能更完善	287	4.2 信号用 SPD 的结构	334
6.3 可选欠电压/失电压重起动功能	287	4.3 信号用 SPD 的内部电路和性能参数	335
6.4 测量功能	287	4.4 信号用 SPD 的选用和安装	337
6.5 带多路通信接口	287	4.5 信号用 SPD 的典型产品	339
6.6 具有维护管理功能	287	5 SPD 的检测	340
6.7 环保	287	5.1 标准规定的 SPD 的检测试验项目	340
6.8 节能	287	5.2 SPD 专用检测试验设备配置	341
6.9 系列化	287	5.3 限制电压测量和动作负载试验	342
第 13 章 终端电器	288	6 低压电涌保护器的发展	345
1 终端电器的概貌	288	6.1 低压电涌保护器产品 (SPD)	345
1.1 终端电器的特点	288	6.2 雷电防护系统技术	346
1.2 系列品种与分类	288	第 15 章 基于现场总线的低压电器和系统	347
1.3 国外终端电器概况	289		
1.4 国内终端电器概况	290		
2 主要产品的用途、结构特点、性能与			

1 低压电器通信原理	347
1.1 低压电器的通信要求和现场总线	347
1.2 低压电器的通信要求	347
1.3 通信传输的机制——周期报文和 非周期报文	347
1.4 有连接通信与无连接通信	348
1.5 ISO 通信模型	348
2 低压电器通信与现场总线	348
2.1 现场总线和通信协议的标准化情况	348
2.2 相关现场总线原理和应用	349
2.3 低压电器的通信数据	357
2.4 将低压电器设备接入网络	360
3 基于现场总线的低压配电和控制系统	360
3.1 基于现场总线的低压配电与控制 系统概述	360
3.2 现场总线技术在低压配电系统中的应用	361
3.3 智能网络低压配电系统中的主要设备	365
3.4 智能网络低压配电与控制系统功能	367
4 低压电器产品的通信性能测试	369
4.1 需要一致性测试的原因	369
4.2 一致性测试的内容和方法	369
4.3 典型的一致性测试系统 (以 DeviceNet 一致性测试为例)	370
5 可通信低压电器发展动态	372
5.1 应用于低压电器的总线技术发展	372
5.2 低压电器元件与系统的发展	372
第 16 章 低压电器标准	373
1 我国低压电器标准体系	373
1.1 概况	373
1.2 标准体系框图	373
2 低压电器主要标准介绍	375
2.1 低压开关设备和控制设备类标准	375
2.2 家用及类似场所用断路器类标准	377
2.3 低压熔断器类标准	379
2.4 低压绝缘配合类标准	379
2.5 其他类标准	380
3 低压电器标准化发展	381
3.1 低压电器标准修订趋势	381
3.2 低压电器标准发展趋势	382
第 17 章 低压电器主要工艺	383
1 低压电器主要工艺及发展动向	383
1.1 概述	383
1.2 塑料件的成型及结构工艺性	384
1.3 冲压件结构工艺性	391
1.4 金属焊接	397
1.5 固态电器制造工艺及 SMT	403
1.6 特种加工工艺	409
2 低压电器在线测试技术与装备	412
2.1 概述	412
2.2 交流接触器自动检测生产流水线	412
2.3 塑壳断路器自动检测生产流水线	413
2.4 万能式断路器自动检测生产流水线	414
参考文献	416
第 3 篇 低压成套开关设备和控制设备	421
第 1 章 概论	423

1 概述	423
1.1 低压成套开关设备和控制设备定义	423
1.2 低压成套开关设备和控制设备的技术 参数范围	423
1.3 低压成套开关设备和控制设备质量 保证的技术措施和手段	423
2 组成与分类	423
2.1 组成	423
2.2 分类	424
3 标准体系	424
3.1 低压成套开关设备和控制设备的标准 基本体系	424
3.2 低压成套辅助设备标准体系	424
4 技术要求	424
4.1 额定电压(成套设备中一条电路的)	425
4.2 额定电流	426
4.3 额定分散系数	427
4.4 额定频率	427
4.5 空壳体的一般要求	427
4.6 提供的资料	427
5 低压电力系统接地方式	428
5.1 接地	428
5.2 低压系统的接地方式	428
5.3 接地系统的安全要求	429
6 安全防护	430
6.1 安全技术要求	430
6.2 电击防护	430
6.3 外壳防护	432
6.4 其他防护问题	432
7 绝缘配合	432
7.1 绝缘配合	432
7.2 绝缘配合和电压关系	433
7.3 绝缘配合和环境关系	433
7.4 绝缘电压及其额定值	433
7.5 绝缘配合与微观环境	434
7.6 电气间隙的确定及影响因素	434
7.7 爬电距离的确定及影响因素	435
7.8 利用带电部分绝缘进行保护实例	436
8 电能质量	437
8.1 电能质量基本概念	437
8.2 电能质量与电力网中的电磁现象	438
8.3 交流电能质量的指标及国家标准	439
8.4 电能质量的补偿	440
9 低压电源系统的雷击脉冲保护	440
9.1 雷电及雷暴分布	440
9.2 雷击防护标准、术语和定义	440
9.3 雷击防护原则及防护系统	441
9.4 雷电防护区划分	441
9.5 雷电防护等级划分	441
9.6 雷击脉冲的防护措施	442
第 2 章 低压成套设备	444
1 概述	444
2 固定面板式成套开关设备和控制设备	444
2.1 开启式成套开关设备和控制设备	444
2.2 固定面板式成套开关设备	444
3 封闭式成套开关设备	444

3.1 简介	444	7.4 SPC100 系列小型自动电源切换开关.....	457
3.2 主要技术数据	444	8 户外多功能动力柜	457
3.3 基本结构	445	8.1 产品型号	457
3.4 典型产品	445	8.2 主要技术参数	457
3.5 金属壳体Ⅱ类保护的成套开关 设备 (GDT 型)	445	8.3 产品结构	457
4 抽出式成套开关设备	446	9 应急电源设备 (EPS)	457
4.1 简介	446	9.1 简述	457
4.2 主要技术参数及要求	446	9.2 分类	458
4.3 基本结构	447	9.3 应急电源 (EPS) 工作原理和主要 技术参数	458
4.4 典型产品	447	10 智能功率电子开关.....	458
5 抽出、分隔混合式成套开关设备	448	10.1 智能功率电子开关安装条件尽可能接近 正常使用条件.....	458
5.1 简介	448	10.2 智能功率电子开关的功能及参数.....	458
5.2 主要技术要求	448	10.3 智能功率电子开关的使用.....	459
5.3 主要技术数据	448	10.4 智能功率电子开关的选型计算.....	459
5.4 基本结构	449	10.5 智能功率电子开关典型产品.....	460
5.5 典型产品	449	第4章 母线干线系统 (母线槽)	462
6 箱组式成套开关设备	449	1 简述	462
6.1 简介	449	2 术语和定义	462
6.2 主要技术参数	450	2.1 母线干线单元	462
6.3 基本结构	450	2.2 带母线分接装置的母线干线单元	462
6.4 典型产品	450	2.3 滑出式分接母线干线单元	462
7 低压固定分隔柜	450	2.4 母线干线变容单元	462
8 密封式成套开关设备	450	2.5 母线干线热膨胀单元	462
9 柜组式成套开关设备	451	2.6 母线换相单元	462
10 在内部故障引起电弧情况下成套 开关设备的特种保护.....	451	2.7 母线干线弯曲单元	462
10.1 内部故障引起电弧的定义.....	451	2.8 母线干线馈电单元	462
10.2 在内部故障引起电弧情况及保护.....	451	2.9 分接单元	462
10.3 一种顶板释压装置.....	451	2.10 用于建筑移动结构的母线干线单元.....	462
第3章 低压动力配电柜 (箱)	453	2.11 母线干线火焰挡板单元.....	462
1 简述	453	2.12 母线干线耐火单元.....	462
2 分类	453	3 母线干线系统 (母线槽) 产品	462
3 技术要求	453	4 主要技术要求	463
3.1 基本技术要求	453	4.1 产品型号及含义	463
3.2 特殊技术要求	453	4.2 正常使用环境条件	463
4 交流低压动力柜	453	4.3 电气性能	463
4.1 GBL1 交流低压动力柜	453	4.4 母线槽的结构	464
4.2 XL 型系列动力柜	453	4.5 安装与维护	467
4.3 箱组式低压动力配电柜	453	5 母线槽设计与计算	467
4.4 采用断路器—熔断器配置的低压动力 配电柜	454	5.1 空气型母线槽	467
5 采用表面安装技术的低压动力配电柜	454	5.2 密集型母线槽	467
5.1 母线安装的特点	454	5.3 阻抗的计算	468
5.2 采用表面安装技术的低压动力配电柜	454	5.4 母线槽应用问题	469
6 HC-XF 型建筑消防用动力柜.....	455	6 典型产品	472
6.1 简述	455	6.1 CCX6、CKX6 母线槽	472
6.2 产品特点	455	6.2 耐火母线槽	472
6.3 产品型号	455	6.3 铝合金外壳密集型母线槽	473
6.4 使用环境及技术参数	455	第5章 照明配电板 (箱)	474
6.5 主要方案及元件选用	456	1 简述	474
6.6 应用举例	456	1.1 定义	474
7 双电源动力柜	456	1.2 分类	474
7.1 双电源切换动力柜主要技术要求	456	2 标准及主要技术要求	474
7.2 双电源切换开关技术要求	456	2.1 结构部件附加要求	474
7.3 WATS 型自动电源切换开关	456	2.2 配电板的特殊要求	474
		2.3 使用条件	474

2.4 设计和结构	474	7.1 产品型号	485
3 典型产品	475	7.2 产品结构和安装方式	485
3.1 通用三箱产品	475	7.3 主要技术指标	485
3.2 立式横装三箱产品	476	第8章 智能型低压成套设备	486
3.3 PXT系列配电箱	476	1 简述	486
3.4 塑料外壳配电板(箱)	476	2 智能型低压成套设备的系统功能	486
3.5 不锈钢壳体的照明箱	477	2.1 智能终端设备	486
3.6 配电箱的附属设备	477	2.2 遥控功能	486
第6章 建筑工地用成套设备(ACS)	479	2.3 遥测功能	486
1 简述	479	2.4 遥调功能	486
2 建筑工地用成套设备(ACS)使用环境	479	2.5 通信功能	486
2.1 正常使用条件	479	2.6 维护管理功能	486
2.2 特殊使用条件	479	2.7 自动控制功能	489
3 建筑工地用成套设备(ACS)分类	479	3 智能型低压成套设备的系统配置方案	489
3.1 可移动性	479	3.1 主站层	489
3.2 功能分类	479	3.2 通信管理层	489
4 主要技术要求	480	3.3 现场层	490
4.1 设计与结构	480	4 智能型低压成套设备的结构要求	490
4.2 外壳防护	480	4.1 通信电缆选型	490
4.3 温升	480	4.2 通信电缆敷设	490
4.4 电击防护	480	4.3 通信电缆连接	490
4.5 短路保护电器的协调	480	4.4 系统接地	490
4.6 ACS内装元件	481	5 智能化电器设备的选型	490
4.7 用挡板及隔板进行ACS内部隔离	481	5.1 进线、联络及馈线(大电流)回路	490
4.8 电气连接母线电缆导线	481	5.2 馈线及配电回路	491
4.9 对电子设备供电电路要求	481	5.3 电动机回路	491
4.10 ACS特性	481	5.4 电容器补偿回路	491
5 典型产品技术参数举例	482	6 智能型低压成套设备的生产工艺要求	491
5.1 产品型号	482	7 智能型低压成套设备的检验要求	492
5.2 产品描述	482	7.1 通信相关参数就地设置	492
5.3 主要技术参数	482	7.2 通信功能稳定性验证	492
第7章 动力配电网用电缆分线箱	483	7.3 远程监控管理功能验证	492
1 简述	483	8 智能型低压成套设备工程设计技术	492
2 动力配电网用电缆分线箱(CDCs) 的使用环境	483	8.1 现场总线类型	492
2.1 正常使用条件	483	8.2 设备的接口规范	492
2.2 特殊使用条件	483	8.3 现场总线网络的施工	493
3 产品分类	483	8.4 主站系统/通信管理设备的安装位置	493
3.1 按不同安装方式分类	483	9 工程应用案例	493
3.2 按壳体不同材料分类	483	第9章 直流开关设备和控制设备	495
3.3 按内装电器元件类别分类	483	1 简述	495
3.4 按不同使用功能分类	483	1.1 直流开关设备和控制设备	495
4 设计与结构	483	1.2 分类	495
4.1 机械设计	483	2 主要性能及技术指标	495
4.2 外壳防护	484	2.1 额定直流输出电流、电压	495
4.3 温升	484	2.2 稳流、稳压精度	495
4.4 电击防护	484	2.3 纹波因数	495
4.5 短路保护电器的协调	484	2.4 效率	495
4.6 CDCs内装元件	484	2.5 功率因数	495
4.7 电气连接母线电缆导线	484	2.6 均流不平衡度	495
5 主要技术要求	484	2.7 噪声	495
6 动力配电网用电缆分线箱(CDCs) 应提供的有关资料	484	2.8 保护及报警	495
6.1 铭牌	484	2.9 绝缘检测	495
6.2 安装操作或维修说明书	485	3 功能单元的主要性能	496
7 典型产品介绍	485	3.1 充电、整流单元	496
		3.2 降压单元	496
		3.3 操作直流电源	496

3.4 监控单元	496	1.1 概述	527
3.5 绝缘检测单元	497	1.2 公用电网对无功功率及功率因数的要求	528
3.6 蓄电池组监测单元	497	1.3 无功功率补偿装置的分类	528
3.7 放电单元	497	2 无功功率补偿控制器	529
3.8 蓄电池组	497	2.1 自动投切控制原则	529
4 直流系统设计及电器元件的选择	498	2.2 有级电容器的动作程序控制	529
4.1 直流系统的设计	498	2.3 电容器补偿装置技术的发展	530
4.2 蓄电池的选择	498	3 带电抗器无功功率补偿	530
4.3 充电装置中整流器的选择	499	3.1 带谐振电抗器无功功率补偿	530
4.4 直流开关和保护电器的选择	499	3.2 带失谐电抗器无功功率补偿	530
5 采用蓄电池的直流设备	500	4 无功功率动态补偿装置	530
5.1 电力系统少维护直流电源设备	500	4.1 分类	530
5.2 智能高频开关直流电源	500	4.2 晶闸管相控电抗器	530
6 阀控密封铅酸蓄电池	502	4.3 TCR 静止型无功补偿装置参数计算	531
6.1 工作原理及密封机理	503	4.4 晶闸管投切电容器 (TSC)	531
6.2 结构特点	503	4.5 TCR+TSC 混合型静止型无功功率补偿装置	532
6.3 电池容量确定	504	第 12 章 谐波补偿装置	533
6.4 阀控式密封铅酸蓄电池的使用维护	504	1 谐波与谐波源	533
7 双电层电容器	506	1.1 谐波	533
7.1 双电层电容器主要特点	506	1.2 谐波的产生及危害	533
7.2 双电层电容器及其蓄能原理	506	2 无源谐波补偿	536
7.3 双电层电容器主要性能、参数	506	2.1 谐振式滤波器谐波补偿	536
7.4 双电层电容器应用中的一般问题	507	2.2 滤波器	536
8 双电层电容器直流设备的应用	507	2.3 带电抗器无功功率及谐波补偿	536
8.1 为变电站合闸母线提供动力	507	3 瞬时无功功率理论	540
8.2 补偿电网闪络	507	3.1 瞬时无功功率	540
8.3 电动机车、拖车、牵引车的起动	507	3.2 电压电流的瞬时值波形与检测	542
8.4 柴油机、汽油机的起动	507	第 13 章 电缆桥架	544
8.5 动力机车及同类设备的制动	507	1 简述	544
第 10 章 交流电动机软起动控制设备	508	2 使用条件	544
1 交流笼型电动机软起动控制技术基础	508	2.1 正常使用条件	544
1.1 交流笼型电动机的机械特性	508	2.2 特殊使用条件	544
1.2 交流笼型电动机的各种起动方式	509	3 主要技术性能	544
1.3 交流笼型电动机软起动的特点	510	3.1 结构材料要求	544
2 交流笼型电动机软起动应用技术基础	511	3.2 主要机械性能	546
2.1 负载转矩与负载转速	511	3.3 主要电气性能	546
2.2 按不同的工业设备工艺要求确定控制方式	513	3.4 耐火要求	546
3 交流笼型电动机软起动设备的工程应用	514	4 产品介绍	546
3.1 交流电动机软起动参数计算基础	514	4.1 梯型电缆桥架	546
3.2 采用软起动时基本参数工程整定	515	4.2 槽型电缆桥架	547
3.3 各类设备选用软起动工程参数整定	516	4.3 托盘式桥架	547
4 交流笼型电动机软起动的电路方案	517	4.4 组合式电缆桥架	547
4.1 交流笼型电动机软起动的单电机主电路方案	517	4.5 耐火电缆桥架	547
4.2 交流软起动与多电动机主电路方案	520	4.6 玻璃钢电缆桥架	548
5 磁控式软起动	521	4.7 铝合金电缆桥架	548
6 晶闸管中压软起动	521	5 系统安装空间布置图	548
6.1 晶闸管串联电路	521	第 14 章 高压/低压预装式变电站	550
6.2 中压软起动装置	521	1 简述	550
6.3 中压软起动装置额定电压、额定电流等参数	522	2 高压/低压预装式变电站使用条件	550
6.4 中压软起动装置的应用电路	522	2.1 正常使用条件	550
6.5 中压软起动装置选型计算	524	2.2 特殊使用条件	550
6.6 典型中压软起动装置简介	525	3 高压/低压预装式变电站额定技术参数	550
第 11 章 无功功率补偿装置	527	3.1 额定电压	550
1 无功功率补偿装置	527	3.2 额定绝缘水平	551
		3.3 额定频率和相序	551

3.4 额定电流和温升	551	4 常用接线辅件	572
3.5 额定短时耐受电流	551	4.1 接线端子排 (terminal block)	572
3.6 额定峰值耐受电流	551	4.2 连接器 (接插件)	576
3.7 额定短路持续时间	551	4.3 端头	577
3.8 操作机构和辅助回路的额定电源电压	551	4.4 专用工具	578
3.9 操作机构和辅助回路的额定电源频率	551	5 常用配线辅件	578
3.10 预装式变电站额定最大容量	551	5.1 行线槽	578
3.11 额定外壳级别	551	5.2 捆线带	579
4 高压/低压预装式变电站电气线路	551	5.3 缠绕管	579
4.1 10kV 环网供电、高供低计电气系统	551	5.4 齿形保护带	579
4.2 10kV 终端供电、高供低计带补偿 电气系统	551	5.5 符号标记	580
4.3 美式预装式变电站电气系统	551	6 母线无孔连接技术	580
4.4 35kV 组合式变电站电气系统	551	6.1 扁平板式无孔连接	580
5 高压/低压预装式变电站的结构	553	6.2 框型导电夹母线端子	580
5.1 高压/低压预装式变电站的结构形式 及特点	553	6.3 勾头螺钉——导电块式母线端子	580
5.2 欧式预装式变电站	554	6.4 导电夹连接技术	581
5.3 美式预装式变电站	554	6.5 母线适配技术	581
5.4 集装箱式预装式变电站	554	7 大电流电缆连接技术	582
5.5 多箱式预装式变电站	554	8 成套开关设备用专用辅件	582
5.6 紧凑小型式预装式变电站	554	8.1 母线支撑件	582
6 典型预装式变电站	555	8.2 门锁	582
6.1 35~10kV 系列预装式变电站	555	第 17 章 低压成套开关设备和控制设备的设计	584
6.2 10/0.4kV 高压/低压系列预装式 变电站	556	1 概述	584
6.3 智能型高压/低压预装式变电站	556	1.1 产品技术标准	584
第 15 章 低压成套设备壳体	559	1.2 产品图样及设计文件标准	584
1 概述	559	1.3 主要技术参数	584
2 标准及主要技术要求	559	1.4 产品图样	586
2.1 标准	559	1.5 产品设计文件	589
2.2 基本概念	559	2 电路设计	591
2.3 分类	559	2.1 主电路设计	591
2.4 主要技术要求	559	2.2 辅助电路	592
2.5 设计和结构	560	2.3 过电流保护功能	593
2.6 典型柜体分析	560	2.4 选择性保护	594
3 工艺与造型	562	3 元器件选择	595
3.1 工艺	562	3.1 计算元件的最大允许工作电流、电压	595
3.2 造型	562	3.2 短路电流的近似计算方法	595
3.3 色彩设计	564	3.3 主要电器元件的选择	596
4 柜体的散热与通风	567	3.4 母排的选择	599
4.1 机柜结构散热与通风的设计原则	567	3.5 中性线 (N)、PEN 及保护导体 (PE) 截面积的选择	599
4.2 自然风冷散热的结构设计	567	3.6 绝缘导线的选择	599
4.3 强迫风冷散热与通风的结构设计	567	4 壳体设计	599
第 16 章 低压成套辅助设备	569	5 总装图、布置图设计	600
1 简述	569	6 低压开关设备的热设计	600
1.1 成套辅助设备	569	6.1 壳体内外热转移过程	600
1.2 在成套设备中的重大作用	569	6.2 开关柜有效散热面积	601
1.3 技术内涵广阔	569	6.3 箱体内温度梯度分布	602
1.4 发展前景	569	6.4 不同有效热面积壳体内部的空气温升分布	603
2 用途与分类	569	6.5 带柜内外空气交换的柜体的热设计	603
3 主要技术参数	570	6.6 空壳体的热耗散能力	605
3.1 电气辅件产品的标准体系	570	6.7 开关设备和控制设备的热设计	606
3.2 名词术语	570	第 18 章 低压成套设备的生产设备及加工工艺	608
3.3 接线端子排的主要特性及技术要求	571	1 简述	608
3.4 电气辅件的塑料件材料要求	571	1.1 低压成套设备的主要制造工序	608
		1.2 生产加工设备	608
		1.3 工艺文件的内容	608

2 壳体加工工艺	609
2.1 钢板下料工艺	609
2.2 冲压工艺	609
2.3 折弯工艺	609
2.4 结构焊接工艺	609
2.5 组装结构工艺	609
2.6 静电粉末涂漆工艺	610
3 电器元件装配工艺	610
3.1 依据和适用范围	610
3.2 设备及工具	610
3.3 准备工作	610
3.4 装配工艺及要求	610
3.5 检查	611
4 一次线加工、装配工艺	611
4.1 依据和适用范围	611
4.2 设备、工具、量具	611
4.3 一次线的选择	612
4.4 母排加工及安装	612
4.5 绝缘导线的加工及安装	614
5 二次线（辅助电路）加工、装配工艺	615
5.1 依据及适用范围	615
5.2 设备及工具	616
5.3 常用行线辅件	616
5.4 二次线工艺	616
6 产品包装工艺	617
6.1 总则	617
6.2 包装	617
6.3 包装标识	618
6.4 其他	618
参考文献	619
第4篇 低压电器与成套设备可靠性技术	621
第1章 概述	623
1 国内外电器可靠性工作概况	623
1.1 国外电器可靠性工作概况	623
1.2 国内电器可靠性工作概况	624
2 可靠性定义	625
3 失效规律	625
4 可靠性技术的基本内容	625
第2章 失效密度函数及累积失效分布函数	626
1 失效频率直方图	626
2 失效密度函数	626
3 累积失效频率直方图	626
4 累积失效分布函数	626
第3章 低压电器可靠性特征量	627
1 不可修复产品的可靠性特征量	627
1.1 可靠度	627
1.2 累积失效概率	627
1.3 失效率	627
1.4 平均寿命	627
1.5 寿命标准离差	627
1.6 可靠寿命	628
1.7 中位寿命	628
1.8 成功率	628
2 可修复产品的可靠性特征量	628
2.1 平均故障率 λ	628

2.2 平均无故障工作时间 MTBF	628
2.3 有效度 A	628
2.4 平均修复时间 MTTR	628
2.5 修复率	628
2.6 可靠度 $R(t)$	628
2.7 故障密度 $f(t)$	629
3 失效密度函数与可靠性特征量之间的关系	629
4 失效分布类型	629
4.1 常见的失效分布类型	629
4.2 失效分布类型的估计方法	634
4.3 失效分布类型的检验方法	635
5 可靠性特征量的估计	640
5.1 可靠性特征量的点估计	640
5.2 可靠性特征量的区间估计	642
5.3 可靠性特征量的图估计	642
第4章 低压电器可靠性抽样检查	646
1 抽样检查方案的分类	646
1.1 按性质分类	646
1.2 按用途分类	646
1.3 按抽样次数分类	646
1.4 按进行方式分类	646
2 抽样检查的基本理论	646
2.1 抽样检查方案的接收概率	646
2.2 抽样检查方案的抽检特性 曲线及参数 p_0, p_1, α, β	647
2.3 抽样检查方案的确定方法	648
3 指数分布时电器产品的可靠性抽样	648
3.1 失效率抽样	649
3.2 平均寿命抽样	650
3.3 可靠寿命抽样	650
3.4 平均寿命序贯抽样	650
4 威布尔分布时电器产品的可靠性抽样	650
4.1 平均寿命抽样	651
4.2 可靠寿命抽样	651
第5章 低压电器可靠性试验理论与方法	653
1 可靠性试验的种类	653
2 可靠性筛选试验	653
2.1 特点	653
2.2 项目、筛选应力以及筛选试验时间（或操作 次数）的确定	653
3 可靠性环境试验	653
4 可靠性测定试验与可靠性验证试验	654
4.1 可靠性测定试验	654
4.2 可靠性验证试验	654
5 可靠性寿命试验（正常寿命试验）	655
5.1 样品数量的确定和抽样方法	655
5.2 失效判据与试验中应监测的参数	655
5.3 试验截止时间的确定	655
6 加速寿命试验	655
6.1 加速寿命试验的分类	655
6.2 恒定应力加速寿命试验的基本原理	655
6.3 恒定应力加速寿命试验方法	655
6.4 恒定应力加速寿命试验的图分析法	656
第6章 低压电器可靠性设计	658
1 可靠性预计	658
1.1 系统的可靠性框图	658

1.2 串联系统的可靠性预计	658	2.3 试验电源条件	690
1.3 并联系统的可靠性预计	659	2.4 负载条件	690
1.4 n 个取 k 系统的可靠性预计	659	2.5 激励条件	690
1.5 串并联系统的可靠性预计	660	3 试验方法	690
1.6 复杂系统的可靠性预计	660	3.1 试品的准备	690
2 可靠性分配	662	3.2 试品的检测	690
2.1 简单的可靠性分配方法(等分配法)	662	3.3 失效判据	690
2.2 根据相对失效率进行可靠性分配	662	4 可靠性验证试验的抽样方案及试验程序	691
2.3 根据各组成单元的重要度及复杂度 进行可靠性分配(AGREE分配法)	662	4.1 可靠性验证试验的抽样方案	691
2.4 花费最小可靠性分配法	663	4.2 可靠性验证试验的程序	691
3 可靠性技术设计	663	5 可靠性试验装置	692
3.1 降额使用	663	5.1 试验装置的技术性能	692
3.2 贮备设计(冗余设计)	663	5.2 试验装置的硬件设计	692
3.3 耐环境设计	663	5.3 试验装置的软件设计	692
3.4 耐热设计	664	第9章 小型断路器的可靠性指标与考核方法	694
3.5 耐振动设计	664	1 可靠性指标	694
3.6 参数设计	664	2 试验要求	695
3.7 容差设计	665	2.1 试验场所	695
4 电器触头的可靠性设计	666	2.2 试验条件	695
4.1 电器触头材料及结构形式的选择	666	3 试验方法	695
4.2 减小与稳定接触电阻的设计方法	666	3.1 试品的准备	695
4.3 减小触头回跳的设计方法	666	3.2 试品的检测	695
4.4 触头的冗余设计	667	3.3 失效判据	695
5 电器中机械构件的可靠性设计	667	4 可靠性验证试验的抽样方案及试验程序	696
5.1 基于应力—强度干涉模型的 可靠性设计的基本原理	667	4.1 可靠性验证试验抽样方案	696
5.2 电器中杆件的可靠性设计	670	4.2 试验程序	697
5.3 电器中弹簧的可靠性设计	674	5 可靠性试验装置	697
6 电器电磁系统可靠性设计	677	5.1 试验装置的技术性能	697
6.1 电器电磁系统可靠性设计的基本原理	677	5.2 试验装置的硬件设计	698
6.2 电器电磁系统可靠性优化设计	678	第10章 剩余电流动作保护器的可靠性 指标与考核方法	699
第7章 控制继电器的可靠性指标与考核方法	685	1 可靠性指标	699
1 可靠性指标	685	2 试验要求	699
2 试验要求	685	2.1 环境条件	699
2.1 环境条件	685	2.2 安装条件	700
2.2 安装条件	685	2.3 试验电源条件	700
2.3 电源条件	685	2.4 负载条件	700
2.4 负载条件	685	2.5 激励条件	700
2.5 激励条件	685	3 试验方法	700
3 试验方法	685	3.1 试品的准备	700
3.1 试品的准备	685	3.2 试品的检测	700
3.2 试品的检测	685	3.3 失效判据	701
3.3 失效判据	686	4 可靠性验证试验的抽样方案及 试验程序	701
4 可靠性验证试验的抽样方案及试验程序	686	4.1 失效率验证试验方案的确定	701
4.1 可靠性验证试验的抽样方案	686	4.2 成功率验证试验方案的确定	701
4.2 可靠性验证试验的程序	687	4.3 漏电保护器成功率验证试验程序	701
5 可靠性试验装置	687	4.4 漏电保护器失效率验证试验程序	702
5.1 试验装置的技术性能	687	5 可靠性试验装置	702
5.2 试验装置的硬件设计	687	5.1 试验装置的技术性能	702
5.3 试验装置的软件设计	688	5.2 试验装置的硬件设计	702
第8章 接触器的可靠性指标与考核方法	690	5.3 试验装置的软件设计	703
1 可靠性指标	690	第11章 低压断路器的可靠性指标与考核方法	705
2 试验要求	690	1 可靠性指标	705
2.1 环境条件	690	2 试验要求	705
2.2 安装条件	690	2.1 环境条件	705

2.2 安装条件	705
2.3 电源条件	705
2.4 负载条件	706
2.5 试验激励条件	706
3 试验方法	706
3.1 试品的准备	706
3.2 试品的检测	706
3.3 失效判据	706
4 可靠性验证试验的抽样方案及试验程序	706
4.1 成功率验证试验方案的选择	706
4.2 成功率验证试验方案的确定	706
4.3 试验程序	706
5 可靠性试验装置	706
5.1 试验装置的技术性能	706
5.2 试验装置的硬件设计	707
第12章 过载继电器的可靠性指标与考核方法	708
1 可靠性指标	708
2 试验要求	708
2.1 环境条件	708
2.2 安装条件	708
2.3 电源条件	708
2.4 激励条件	708
3 试验方法	708
3.1 试验内容	708
3.2 试品准备	708
3.3 试验检测	708
3.4 失效判据	709
4 可靠性验证试验的抽样方案及试验程序	709
4.1 成功率验证试验方案的确定	709
4.2 试验程序	709
5 可靠性试验装置	709
5.1 试验装置的技术性能	709
5.2 试验装置的硬件设计	710
5.3 试验装置的软件设计	710
第13章 低压成套开关设备与控制设备	
可靠性指标与分析	711
1 低压成套开关设备与控制设备的	
可靠性指标体系	711
1.1 层次分析法	711
1.2 低压成套设备层次结构数学模型	711
1.3 构造判断矩阵	712
1.4 低压成套设备可靠性指标体系	712
2 低压成套开关设备与控制设备的	
故障树分析方法	712
2.1 故障树的建造	713
2.2 故障树定性分析	714
2.3 故障树定量计算	714
2.4 故障树分析软件	716
附录	720
附录 A Γ 函数表	720
附录 B 标准正态分布函数	
$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{v^2}{2}} dv$ 数值表	720
附录 C χ^2 分布下侧分位数 $\chi^2_p(f)$ 表	721
参考文献	724

第5篇 低压电器试验与检测技术	725
第1章 概述	727
第2章 低压电器试验中测量的基本知识	728
1 概述	728
1.1 测量的基本方程	728
1.2 单位制和单位	728
1.3 测量设备	729
2 测量方法和测量误差	729
2.1 测量方法	729
2.2 测量误差	729
2.3 误差的统计处理	730
3 仪器仪表误差和准确度	732
3.1 仪器仪表误差	732
3.2 仪器仪表准确度	732
3.3 测量不确定度	732
第3章 试验参数的测量	734
1 电量参数的测量	734
1.1 电压测量	734
1.2 电流测量	735
1.3 功率测量	737
1.4 频率测量	739
1.5 功率因数测量	739
1.6 时间常数测量	742
1.7 电阻测量	742
2 非电量参数的测量	743
2.1 时间测量	743
2.2 焦耳积分测量	743
2.3 温度测量	743
2.4 磁通测量	745
2.5 力和力矩测量	746
2.6 长度和位移测量	747
2.7 触头参数测量	747
第4章 低压电器试验的计算机测试技术	749
1 低压电器的测试技术	749
2 塑壳断路器特性测试技术	749
2.1 过载特性测试技术	749
2.2 瞬动特性测试技术	751
2.3 机械操作测试技术	756
3 接触器寿命试验技术	756
3.1 试验方法	756
3.2 试验的计算机控制技术	756
3.3 交流接触器寿命试验装置	757
4 剩余动作电流保护器的漏电特性测试技术	760
4.1 试验设备的技术特点	760
4.2 硬件设计	761
4.3 软件设计	761
5 过载继电器的过载特性测试技术	761
5.1 测试要求	761
5.2 硬件设计	762
5.3 软件设计	763
第5章 电器试验参数高速采集与处理技术	764
1 电器试验参数采集与处理技术的发展	764
2 电器试验的测试技术	764
2.1 主要内容	764
2.2 试验参数的计算	764

3 电器试验参数高速采集与处理系统	765	(CTI) 试验及设备	812
3.1 硬件设计	765	7.2 抗非正常热和着火危险试验及设备	814
3.2 软件设计	767	7.3 耐热性能试验及设备	815
第6章 电器特殊参数的测量技术	770	8 环境试验设备	816
1 接触电阻的测量技术	770	8.1 高低温试验箱	816
1.1 接触电阻的分析	770	8.2 湿热试验箱	816
1.2 测量的一般方法	771	8.3 霉菌试验箱	816
1.3 脉冲电流测量接触电阻的装置	772	8.4 盐雾试验箱	817
1.4 脉冲电流测量技术的应用	773	9 电磁兼容试验及设备	817
2 电器电弧动态拍摄技术	775	9.1 电磁发射试验及设备	818
2.1 电器电弧拍摄的一般方法	775	9.2 电磁抗扰度试验及设备	821
2.2 电器电弧动态拍摄方法	776	9.3 低压电器主要产品的电磁兼容 试验项目	829
2.3 电弧图像处理方法	778	10 其他试验及设备	829
第7章 常用仪器仪表	780	10.1 外壳防护等级试验设备	829
1 指示仪表	780	10.2 耐振动和冲击试验设备	831
1.1 技术条件	780	10.3 寿命试验及设备	832
1.2 分类	781	10.4 辅助试验设备	834
1.3 使用方法	781	参考文献	836
2 数字仪表	783	第6篇 低压成套开关设备和控制设备	
2.1 类型	783	试验与检测技术	837
2.2 工作特性	783	第1章 概述	839
2.3 选用方法	784	1 产品检测简述	839
3 比较式仪器	784	1.1 产品检测、检验	839
3.1 直流电位差计	784	1.2 检测产品性能的试验分类	839
3.2 直流电桥	784	1.3 产品检测依据	839
4 扩大量程装置	784	1.4 产品检测的功能和步骤	839
4.1 仪用互感器	785	2 与产品检测有关的标志的含义	840
4.2 分流器	789	2.1 CMA 标志的含义	840
5 记录仪器	789	2.2 CAL 标志的含义	840
5.1 光线示波器	789	2.3 CNAS 标志的含义	840
5.2 数字存储示波器	792	第2章 常规试验	841
6 其他仪器仪表	792	1 简述	841
6.1 频率谐波分析仪	792	2 温升试验	841
6.2 多功能钳形功率表	792	2.1 试验设备	841
第8章 低压电器试验及常用设备	794	2.2 试验环境条件	841
1 电源设备	794	2.3 试验方法及要求	841
1.1 大电流交流试验电源	794	2.4 试验结果判定	843
1.2 大电流直流试验电源	796	3 介电性能试验	843
1.3 其他常用试验电源	797	3.1 试验设备	843
2 负载阻抗	797	3.2 正常使用环境条件	843
3 温升试验及设备	799	3.3 试验方法及要求	844
3.1 电器零部件表面温升的测量及设备	799	4 短路耐受强度试验	845
3.2 线圈温升的测量及设备	800	4.1 适用范围及依据	845
4 介电性能试验及设备	801	4.2 名词定义	846
4.1 工频耐受电压试验及设备	801	4.3 试验总则	846
4.2 冲击耐受电压试验及设备	803	4.4 主电路试验	846
4.3 绝缘电阻的测量及设备	805	4.5 保护电路的短路强度试验	848
5 动作范围试验及设备	806	4.6 短路试验设备	848
5.1 电器动作特性测定试验及设备	806	5 防护措施和保护电路有效性检查	849
5.2 保护特性测定试验及设备	808	5.1 防护措施检查	849
6 短路试验及设备	808	5.2 保护电路有效性验证	851
6.1 额定短时耐受电流能力试验	808	6 电气间隙和爬电距离测量	851
6.2 额定短路接通和分断能力试验	810	6.1 电气间隙测量	851
6.3 常用试验设备	811	6.2 爬电距离测量	852
7 材料试验及设备	812		
7.1 绝缘材料相比漏电起痕指数			

6.3 有槽和筋的电气间隙和爬电距离测量	853	3.8 绝缘材料耐受非正常发热试验	871
7 机械操作试验	854	3.9 防止火焰蔓延的试验	871
7.1 试验方法及要求	854	3.10 建筑结构中防火性能的试验	873
7.2 试验结果	854	第5章 配电板试验	875
8 防护等级试验	854	1 简述	875
8.1 试验设备	854	2 试验项目	875
8.2 防水、防尘试验的环境条件	855	3 试验方法	875
8.3 试验方法及要求	855	3.1 试验程序	875
8.4 防护等级的含义及试验方法	855	3.2 温升试验	875
8.5 试验结果判定	856	3.3 防护等级试验	876
9 连接线、通电操作	856	3.4 结构和标志检查	876
9.1 开关器件和元件的选择与安装检查	856	3.5 冲击强度试验	877
9.2 母线与绝缘导线	857	3.6 耐锈性能和耐潮湿性能试验	877
9.3 防护措施检查	858	3.7 绝缘材料的耐热性试验	878
9.4 铭牌标志检查	858	3.8 对非正常热和着火危险的耐受能力试验	878
9.5 结构检查	858	3.9 附件紧固的机械强度验证	878
9.6 机械操作零部件、联锁、锁扣检查	858	第6章 建筑工地用成套设备 (ACS) 试验	879
9.7 技术数据检查	858	1 简述	879
9.8 出厂技术资料图纸检查	858	2 型式试验项目	879
9.9 通电操作	858	3 试验方法	879
9.10 试验结果	858	3.1 防护等级试验	879
10 绝缘电阻测量	858	3.2 机械强度试验	879
10.1 试验设备	858	3.3 耐腐蚀能力试验	880
10.2 试验条件	858	3.4 连接线、通电操作	880
10.3 试验程序	858	第7章 动力配电网用电缆分线箱 (CDCs) 试验	881
10.4 试验结果判定	859	1 简述	881
11 EMC 试验	859	2 型式试验项目	881
11.1 简述	859	3 试验方法	881
11.2 低频扰动	859	3.1 短路耐受强度试验	881
11.3 高频干扰	859	3.2 机械强度试验	881
11.4 发射	863	3.3 防护等级试验	883
12 封闭式低压成套设备在内部故障引起电弧情况下的试验	864	3.4 对高热和火焰的耐受能力的试验	883
12.1 适用范围	864	3.5 耐腐蚀、耐老化试验	884
12.2 名词定义	864	3.6 连接线、通电操作	886
12.3 试验安排	864	第8章 低压成套开关设备和控制设备空壳体试验	887
12.4 试验程序	864	1 简述	887
第3章 低压成套开关设备试验	866	2 型式试验项目	887
1 简述	866	3 试验环境条件	887
2 型式试验项目	866	4 试验方法	887
3 试验方法	866	4.1 静负载	887
3.1 短路耐受强度试验	866	4.2 提升	887
3.2 EMC 试验	866	4.3 金属插件轴向负载的验证	887
3.3 成套设备中电器和独立元件的试验	867	4.4 外部机械冲击防护等级的验证 (IK 代码)	888
3.4 功能测试	867	4.5 绝缘材料性能	888
第4章 母线干线系统试验 (母线槽)	868	4.6 介电强度验证	889
1 简述	868	4.7 耐老化验证	889
2 型式试验项目	868	4.8 耐腐蚀验证	890
3 试验方法	868	4.9 标志	890
3.1 温升试验	868	第9章 高压/低压预装式变电站试验	891
3.2 短路耐受强度试验	868	1 简述	891
3.3 保护电路有效性检测	869	2 型式试验项目	891
3.4 母线干线系统电气性能的试验	869	3 试验方法	891
3.5 结构强度的试验	870	3.1 绝缘试验	891
3.6 滑触式干线系统耐久性的试验	871		
3.7 耐压力性能试验	871		

3.2 温升试验	892	4 试验方法	906
3.3 接地回路短时耐受电流及峰值耐受 电流试验	892	4.1 一般检查	906
3.4 操作系统功能试验	893	4.2 温升试验	907
3.5 防护等级验证	893	4.3 介电性能试验	908
3.6 外壳耐受机械应力的试验	893	4.4 绝缘电阻测试	908
3.7 评估内部故障电弧效应试验	894	4.5 动作性能测试	908
3.8 噪声试验	895	4.6 热继电器动作性能试验	908
3.9 功能试验	896	4.7 自耦变压器空载试验	909
第 10 章 交流电动机电力电子软起动装置试验	897	4.8 转换器件动作性能试验	909
1 简述	897	4.9 自耦变压器湿热性能试验	909
2 型式试验项目	897	第 13 章 低压无功功率补偿装置试验	910
3 试验方法	897	1 简述	910
3.1 一般检验	897	2 型式试验项目	910
3.2 噪声测定	897	3 试验方法	910
3.3 温升试验	897	3.1 一般检查	910
3.4 轻载试验	898	3.2 通电操作试验	911
3.5 电力电子控制器操作性能试验	898	3.3 工频过电压保护试验	911
3.6 软起动特性试验	898	3.4 温升试验	911
3.7 软停车特性试验	899	3.5 放电试验	911
3.8 限流起动控制特性试验	899	3.6 涌流试验	911
3.9 断相保护试验	899	3.7 缺相保护试验	911
3.10 过载保护试验	899	3.8 动态响应时间测试	911
3.11 逆序保护试验	899	3.9 环境温度性能试验 (仅适用于户外型装置)	912
3.12 散热器过热保护	899	3.10 噪声测试	912
3.13 限流起动超时保护	899	第 14 章 低压无功补偿控制器试验	913
3.14 起动峰值过电流保护	899	1 简述	913
3.15 连续运行试验	899	2 型式试验项目	913
3.16 环境温度性能试验	899	3 试验方法	913
3.17 控制单元高低温循环试验	900	3.1 一般检查	913
3.18 控制单元的高温存放试验	900	3.2 电气性能试验	913
3.19 振动试验	900	3.3 连续运行检验	914
第 11 章 低压直流成套开关设备和控制设备试验	901	3.4 高低温储存试验	914
1 简述	901	3.5 环境温度性能检验	914
2 型式试验项目	901	3.6 抗干扰试验	914
3 试验方法	901	3.7 振动试验	915
3.1 一般检查	901	3.8 跌落冲击检验	915
3.2 温升试验	901	第 15 章 节电装置试验	916
3.3 噪声试验	902	1 简述	916
3.4 功能试验	902	2 试验环境条件	916
3.5 性能试验	902	3 型式试验项目	916
3.6 并机均流不平衡度试验	903	4 试验方法	916
3.7 事故放电能力试验	904	4.1 耐腐蚀、耐老化的验证	916
3.8 连续供电能力试验	904	4.2 温升试验	916
3.9 电磁兼容性 (EMC) 试验	904	4.3 防护等级验证	916
3.10 过载能力试验	905	4.4 电压稳定精度的检测	916
3.11 环境性能试验	905	4.5 空载损耗和空载电流检测	916
第 12 章 自耦减压起动控制装置试验	906	4.6 负载损耗检测	916
1 简述	906	4.7 输入侧功率因数检测	916
2 特性	906	4.8 节电率检测	917
2.1 额定起动电压	906	第 16 章 电控配电用电缆桥架试验	918
2.2 额定工作功率 P_N	906	1 简述	918
2.3 额定工作制	906	2 试验依据和试验项目	918
2.4 短时工作制	906	2.1 试验依据	918
2.5 起动特性	906	2.2 试验项目	918
3 型式试验项目	906	3 试验方法	918

3.1 外观检查	918	2.2 试验环境条件要求	923
3.2 机械负载试验	918	2.3 试验依据及试验项目	923
3.3 支吊架负载试验	919	2.4 试验方法	923
3.4 撞击试验	919	3 低压抽出式成套开关设备和控制设备	
3.5 人工气候防护试验—交变湿热试验	919	辅助电路用接插件试验	928
3.6 人工气候防护试验—盐雾试验	919	3.1 适用范围	928
3.7 表面防护层厚度试验	920	3.2 试验依据	928
3.8 表面防护层附着力试验	920	3.3 试验环境条件	928
3.9 表面防护层均匀性试验	920	3.4 试验项目	928
3.10 保护电路连续性试验.....	921	3.5 试验方法	928
3.11 防护等级试验.....	921	4 低压成套开关设备和控制设备	
3.12 耐火电缆桥架的耐火等级试验.....	921	用母线架试验	930
3.13 玻璃钢及其他非金属桥架的		4.1 适用范围	930
火焰蔓延试验.....	922	4.2 试验依据	930
3.14 玻璃钢及其他非金属桥架的		4.3 试验环境条件	930
耐水性试验.....	922	4.4 试验项目	930
3.15 玻璃钢及其他非金属桥架的		4.5 试验方法	930
耐化学腐蚀性试验.....	922	5 端头试验	931
3.16 玻璃钢及其他非金属桥架的		5.1 适用范围	931
耐工频电气强度试验.....	922	5.2 试验环境条件	931
3.17 玻璃钢及其他非金属桥架的		5.3 试验依据	931
表面电阻率试验.....	922	5.4 试验项目	931
3.18 玻璃钢及其他非金属桥架的		5.5 试验方法	931
体积电阻率试验.....	922	6 低压抽出式成套开关设备和控制设备	
3.19 外观检查.....	922	主电路用接插件试验	935
3.20 防护层厚度检查.....	922	6.1 适用范围	935
3.21 保护电路连续性试验.....	922	6.2 试验依据	935
第 17 章 低压成套辅助设备试验	923	6.3 试验环境条件	935
1 简述	923	6.4 试验项目	935
2 接线端子排试验	923	6.5 试验方法	935
2.1 适用范围	923	参考文献.....	936

第1篇 概 论

主编单位：天津电气传动设计研究所

河北工业大学

主 编：仲明振 郭保良 陆俭国

编写人员：仲明振（天津电气传动设计研究所）

郭保良（天津电气传动设计研究所）

陆俭国（河北工业大学）

第 1 篇 概 论

1 低压配电工程与低压配电系统

低压配电系统从技术角度看,是指在电能输、配、供电的系统中,属于电压等级为低压(交流 1000V、频率 50Hz,直流 1500V)范围内的电力系统。它在电能输、配、供电的系统中数量最多、服务面积大、影响范围广(量大面广),直接影响到最大多数人的利益,与国计民生息息相关。它历来受到从政府到企业、科研部门、高等学校,直至普通百姓的瞩目,是中国“十一五”发展纲要中重点发展的装备制造业的基础。它所涉及的技术几乎囊括电工领域技术的全部,从经典的电磁理论到现代数字控制技术、网路传输,从现代的金属合金、非金属材料到经典材料——铜、铝、钢以及各类工程塑料等。它的发展和前景为:由于低压配电系统新材料、新理论、新技术、新工艺不断诞生,网路容量不断扩大,要求电能质量不断提高,低压配电系统也将不断地扩增和更新。

低压配电系统是将低压电器及各类测量、显示、控制、信号、保护、调节等设备,通过制造商(生产厂)负责完成其所有内部的电气和机械连接,用具有保护功能的结构部件完整地组装在一起的组合体。在这一组合体中安装了如下电器:

- (1) 配电电器,如低压断路器、隔离器、隔离开关及熔断器组合电器、双电源转换开关、熔断器。
- (2) 控制电器,如接触器、起动器。
- (3) 控制电路电器,如中间继电器、时间继电器、万能转换开关、位置(行程)开关、按钮、主令控制器、接近开关、控制器、电阻器、信号灯。
- (4) 终端电器(家用及类似场所用电器、模数化终端组合电器)。
- (5) 由电力电子器件和微电子芯片组成的功率控制开关、专用智能化控制器、可编程控制器及各种电能计量、监控仪表等。

上述这些电器组成的配电系统即可实现电能输、配、供电的功能。这里还需指出的是:低压电器的发展是低压成套开关设备和控制设备发展的有力保证,而成套设备的发展要求又是促进低压电器发展必不可少的条件,可谓“元件推成套,成套促元件”。

当今低压配电系统作为国家大电网的末端,它的可靠运行是整个电网运行可靠性链中的一个重要组成部分。为了确保低压配电系统运行安全、稳定、可靠,从部件到系统都要依据可靠性理论与方法来确定可靠性特征量,进行以提高运行可靠性为目标的可靠性设计,并从设计到元器件采购、组装、制造都要贯彻一系列必要的技术措施,最终达到系统运行的可靠性。除可靠性理论、设计及制造外,部件和系统的可靠性是建立在可靠性试验基础上的。因此了解并实施这些试验也是低压配电系统不可或缺的组成部分,并构成完整的低压配电工程。

总的来说,从事低压电网(系统)研究、设计、开发、制造、试验(检验)、安装、运行的技术实践,统称低压配电工程。本卷重点阐述低压配电系统中两大类主要设备(低压电器与低压成套设备)的研发、设计、试验与检测。

1.1 低压电网结构

低压电网是低压配电系统从设备角度看的另一个名称。它是介于一侧为发电(发电机)、输电(电缆及架空线)和变压器(变压器及母线槽)设备,另一侧为电动机、电动执行机构(电磁阀)、照明、空调、加热、信息设备等终端用电设备之间的连接环节。从电网到用电设备之间需要一定数量的低压电器及其他测量、控制、自动化、仪器、仪表、保护器件和装置组成的低压成套开关设备,来传输、分配电能,并串联配置一系列不同脱扣等级的保护电器,以保证电网的连续、可靠、少故障、合理、经济运行。图 1.1-1 为低压电网系统结构示意图。

电网运行中需设立具有电网安全运行保护任务的功能部件。电网的保护任务是:监测故障,并且有选择性地把已出现故障的电网的全部或局部,从电网中切断出去;而且能用短的分断时间限制故障电弧的能量,使故障的波及面尽可能限制在小范围;将故障电弧造成的影响控制在最小程度。

电网的连接与运行还要考虑到电网间的相互影响。工业电网和建筑物电网中,功率密度高、单机设备功率大、相互间隔距离又相当近,这造成了低压电网和上级高压电网间紧密的制约关系。低压电网内的短路、设备的起动过程会对高、中压电网产生影响,高、中压电网的开关状态也会影响下级系统运行连续性的保护设计。总之,电网结构及其保护结构要相互协调,保护功能要相互配合。

1.2 低压电网的基本数据

在设计与选用成套设备和系统元件时,要重视安装与使用的设备和元件的电网数据、电网状况与工作方式。电网的基本数据为额定电压、额定频率和短路特性。供电网路在规划设计阶段就已确定这些数据。

1.2.1 额定电压

根据我国现行供电系统标准,可供选择的额定电压如表 1.1-1 所示(依据 GB/T 156—2007《标准电压》)。

表 1.1-1 标准电压的分类	
电压	三相四线系统或三相三线交流系统标称电压值及电气设备的额定电压值
	220/380V
	380/660V
	1000/1140V

1.2.2 额定频率

我国现行电网运行的频率为 50Hz, GB/T 1980—2005《标准频率》规定:

- (1) 电气设备的标准频率值从 50~1000Hz。
- (2) 其数值序列有: 50 (60), 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 750, 1000。

1.2.3 短路电流

短路电流是电网中发生短路时出现的电流,是可能出现的最大预期电流。人们依据短路电流来选择低压开关电器和配电设备。

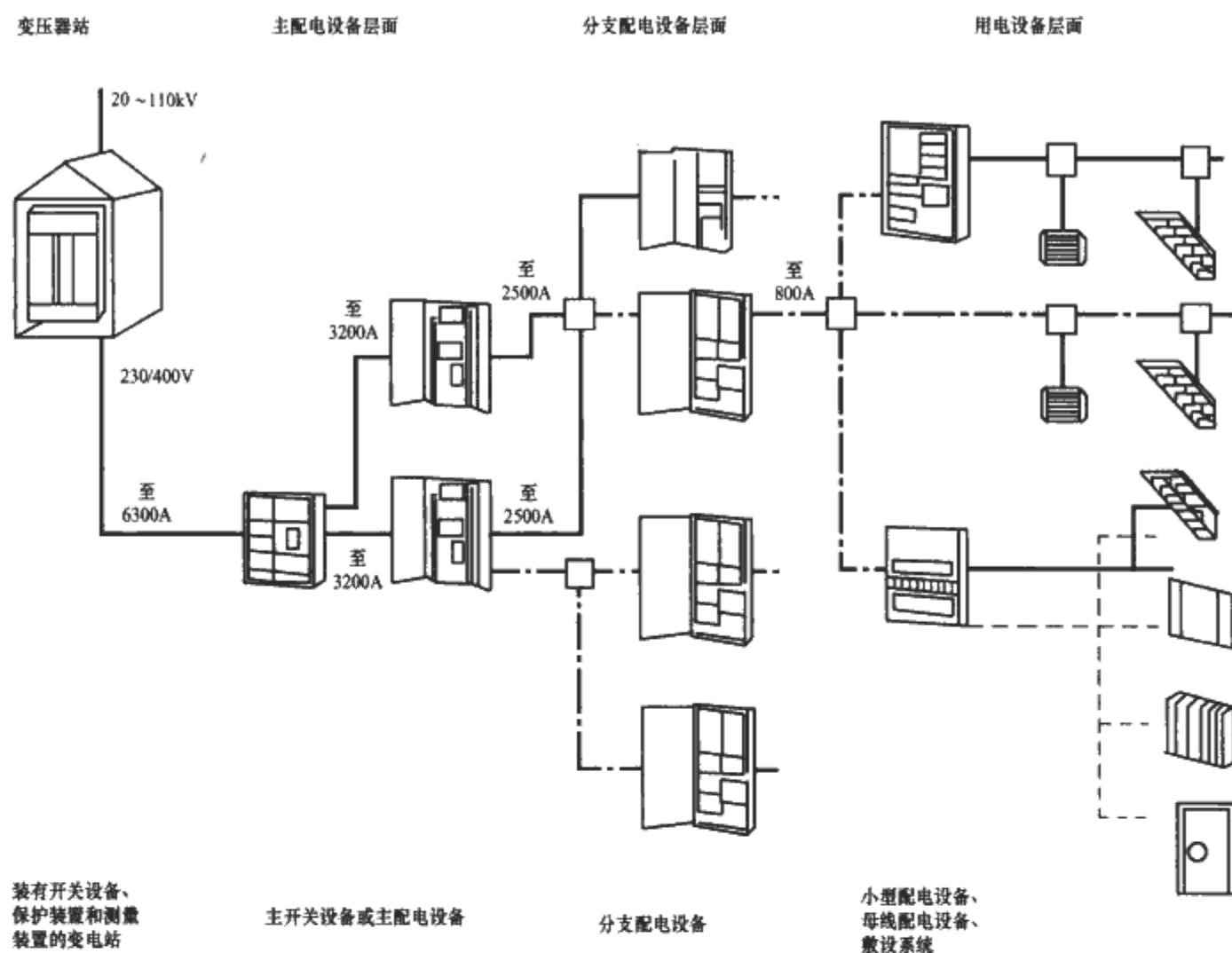


图 1.1-1 低压电网系统结构示意图

1.3 低压电网的总体设计简介

1.3.1 低压电网的设计影响因素

各供电区域的低压电网设计取决于下列因素：

- (1) 供电部门的供电电压等级。
- (2) 供电区域的建筑物、工业设备密度。
- (3) 与供电变压器的距离，尽可能减少输配电损耗。
- (4) 设计的主配电网方案的可行性。

(5) 备用电源类型，分散还是集中，高压侧还是低压侧。

1.3.2 网络的总体设计

(1) 网络的总体设计程序有：建筑总体规划图，总体设计说明，电力负荷等级及供电要求，确定用电负荷，确定计算负荷，绘制配电层面布局图。

(2) 电力负荷等级及供电要求。按电力负荷等级和供电要求做好规划，保证供电质量良好、经济安全运行。

(3) 确定用电负荷及配电所布置。用电负荷的计算是指“计算负荷”，用电负荷的计算方法通常有如下几种：常用系数法（确定用电负荷系数），二项式法，单位产品耗电量法，单位面积耗电量法等。

(4) 确定计算负荷。

(5) 绘制配电层面布局图。

1.4 主开关设备、分支配电设备和控制设备

低压成套开关设备和控制设备从结构上看没有严格区分，在大多数情况下，是由用户从用途来确定其名称，将工业低压电网合理地划分为主开关设备（动力中心）与后接的分支配电设备。主开关设备直接由配电变压器供电，主开关设备中应用的电源开关和分支配电设备用的联络开关多选用断路器，也有用隔离开关或熔断器组合开关。分支配电设备

接在主开关设备后面，用于向负载供电，分配电能。

电能来自两个独立配电变压器系统，它们分别通过两个主开关设备（内装框架式断路器）引入低压网。每个独立电源通过两只塑壳断路器将电能再分配到需要的负荷上。两个电源之间，又通过隔离开关联络，做到互为备用。低压配电系统中，上一层统称为主开关设备，下面的几层分别称为分支配电、动力配电或终端配电设备。

1.4.1 主开关（主配电）设备

从电网到用电设备之间需要一定数量的低压电器、低压开关设备及其他测量、控制、自动化、仪器、仪表、计量、保护器件和装置组成的低压成套开关设备，来传输、分配质量优化的电能，并串联配置一系列不同脱扣等级的保护电器，以保证电网的连续、可靠、少故障、合理、经济运行。

主开关设备安装在靠近配电变压器的位置，它布置于配电室通向变压器的一侧，并使开关设备与变压器用电缆或母排母线槽的连接要尽可能短。

主开关设备的功能是：

(1) 接受电能，其所在的配电柜也称受电柜。

(2) 主开关设备的第一个电器组件（即成套开关设备组合的第一个受电电器）要承担短路保护任务。

(3) 主开关设备内部器件，用于供电、分支、和母线联络、电能计量以及防雷击脉冲保护等。

(4) 主开关设备中要设有电能输入的导体连接部分，含电缆进线、母排进线、母线槽进线。

(5) 主开关设备输出按低压系统的接地方式，具有符合要求的相线、中线（N）、地线（PE），并有专用标志。

(6) 采用纵向联络的双电源供电，其中一个电源平时是断开的，当电源出现供电故障时，它就能转换到另一个电源上，以便后接分支配电设备连续供电。

1.4.2 分支配电设备

分支配电设备的功能是:

- (1) 向所有用电设备供应电能。
- (2) 确保供电安全,设置必要的安全保护,如过电流保护、漏电保护、防雷击过电压保护。
- (3) 方便与用电设备和下级末端配电盘的连接,并实现选择性保护。
- (4) 实现符合标准的绝缘配合,提供实现防电击防护措施。
- (5) 安装分支配电设备电能计量,促进用电管理,节约能源。
- (6) 可设置智能化控制,实现遥控、遥信、遥调,优化成套设备的配电功能,保证安全运行。

1.4.3 控制设备

1.4.3.1 定义

在成套开关设备中除去主开关设备和分支配电设备之外,还有一系列用来控制大容量甚至于中压(电压为1000V~37kV)的电动机拖动的负载,或其他需要由主配电室直接控制与配电的负荷,还有近代的电动机中心等,这种设备被称为成套开关设备中的控制设备。

1.4.3.2 控制设备的功能

- (1) 向用电设备分配、输送电能。
- (2) 完成机械设备工艺要求的正常起动、制动、停止、调速等运行程序。
- (3) 提供对机械设备安全运行的保护,保证电网的安全运行。

对于低压成套开关设备,控制设备大约占到了70%以上,这是因为除了考虑到留有一定的裕度外,配电容量的大部分通过用电设备将电能转化为各种形式的动能。常见的控制设备有各种型号的动力柜、照明箱、电源设备(包括交流、直流电源设备, EPS、UPS 设备),还包括新型的电力电子设备(直流电动机调速设备、交流电动机起动设备、交流电动机调速设备、无源谐波补偿设备、有源谐波补偿设备、电能质量改善设备),无功功率补偿设备,以及大量用于建筑楼宇的建筑电气设备中的若干家用、商用电气设备,各类工业装备的专用电器设备(黑色、有色冶金、矿山电气设备),交通(铁道、公路、水运、海运、港口)电气设备等,几乎遍及国民经济所有领域(除那些直接采用其他形式能源的设备外)。

1.5 智能化配电系统

低压配电系统是指在电能输、配、供电的系统中属于电压等级为低压(交流1000V、频率50Hz,直流1500V)范围内的电力系统。但近代这一系统随着计算机、信息、微电子、电力电子、自动控制等技术发展,已经进入智能化时代,出现了智能化低压配电系统。它基本上是在常规的低压电力系统集中监控基础上发展起来的,其特点是:

- (1) 工作可靠,工作特性稳定,精度高。
- (2) 特性曲线由软件确定,整定方便,调节范围广。
- (3) 具有系统运行质量分析、记录和监控等功能(如参数波形图分析,电压、电流、有功功率、无功功率日变化,频率变化等电网基本运行参量)。
- (4) 自寻优系统运行管理,对潜在问题预报,故障分析、预处理,系统内的通信,系统与主操作监控室的通信,打印报表。

2 本卷主要内容

本卷主要讨论低压电器、低压成套开关设备和控制设备及它们的设计、制造(组装)、工艺,有关国际、国家、行业标准,检验和试验及运行可靠性等内容。

2.1 低压电器主要内容

2.1.1 低压电器产品的主要内容

主要叙述以下产品的结构、工作原理、主要技术参数、性能以及选用与维护:

- (1) 低压断路器。
- (2) 低压隔离器、隔离开关、熔断器组合电器。
- (3) 接触器、起动器。
- (4) 熔断器。
- (5) 双电源自动转换开关。
- (6) 控制与保护电器:

- 1) 小型断路器。
- 2) 漏电电器。
- 3) 基于现场总线的低压电器及系统。
- 4) 低压浪涌保护器。

2.1.2 低压电器技术方面的主要内容

主要阐述低压电器的基础理论、设计方法、主要工艺、标准,主要内容如下:

- (1) 低压电器基础理论:
 - 1) 低压电器开断过程与电弧电接触理论。
 - 2) 开关电弧的最新发展。
 - 3) 低压电器的发热理论与计算。
 - 4) 低压电器电动力分析计算。
 - 5) 低压电器电磁系统理论与计算。
- (2) 低压电器设计方法:
 - 1) 低压电器传统设计方法。
 - 2) 低压电器三维造型设计与CAD、CAE主要软件。
 - 3) 低压电器现代设计技术与虚拟样机。
- (3) 低压电器主要工艺:
 - 1) 低压电器主要工艺。
 - 2) 低压电器主要工艺发展动向。
 - 3) 低压电器在线测试技术与装备。
- (4) 低压电器标准:
 - 1) 我国低压电器标准体系。
 - 2) 低压电器主要标准。

2.2 低压成套开关设备和控制设备主要内容

2.2.1 低压成套开关设备和控制设备产品的主要内容

2.2.1.1 低压成套开关设备

(1) 主要组成部分。包括成套开关柜、动力柜、照明配电板(盘、箱)、母线干线系统(母线槽)、建筑工地用成套设备、电缆分线箱、直流开关设备、无功功率补偿设备、谐波补偿设备、电缆桥架、箱式变电站等。

(2) 主要共性内容。侧重介绍上述各类产品中的共性技术,包括电路配置方案,主要的元器件选择,连接用母排、电缆、电线、绝缘件选型,结构布置,产品分类等。

2.2.1.2 低压成套控制设备

低压成套控制设备主要是指属于配电范围内,用于对用电设备完成供电、工作过程控制、运行安全保护的一种设备,包括电动机软起动设备、双电源设备、消防用设备、电动机智能型保护设备等。

2.2.1.3 低压成套辅助设备

介绍低压成套开关设备的辅助设备（简称“电气辅件”），电气辅件原为八大类（接线座、连接器、端头、配线件、标记、专用工具、安装件、复归件）产品，随着成套设备的进一步发展和国外技术的引进，涌现出一大批技术先进、新颖的电气辅件，大体上可将其分成电气接线辅件、电气配线辅件、结构辅件三大类。

2.2.1.4 其他设备

（1）电缆桥架。它们有典型桥架产品，如钢制、铝制、玻璃钢制、耐火桥架，组合式桥架产品，金属吊装配线槽，桥架的辅助设备。

（2）空壳体。本篇介绍的适用于应用于不同领域、不同环境条件下的低压成套开关设备和控制设备类产品的外保护壳体，依尺寸大小、使用材料、制作工艺、工艺造型、外涂敷、保护类别、应用目的（可移或固定安装、抽出、分隔式）、安装环境等不同，品种繁多。它们有钢制、包塑钢制、不锈钢制、塑料制、板材焊接型、组装、模压铸造，Ⅰ类保护、Ⅱ类保护等。

2.2.2 低压成套开关设备和技术方面的主要内容

（1）从成套设备基础技术角度出发，介绍的有接地技术、安全与防护、绝缘配合、电能质量、无功补偿、谐波补偿等，还介绍了谐波补偿的无功补偿设备、动态无功补偿设备、瞬时无功理论，谐波补偿重点是谐波补偿参数计算与有源静止型补偿。此外还介绍直流开关设备的一些新技术、新产品，如采用纳米技术，电容量达法拉级的、储能接近蓄电池 1/2 的双电层电容器及其直流开关设备，应急电源（EPS）等。接地技术中重点说明辅助等电位接地和局部等电位接地以及它们在解决抗干扰、提高供电电能质量中的重要作用。绝缘配合除提供基本绝缘选择参数的基本图、表外，着重说明双绝缘、附加绝缘，例如绝缘壳体、母线架的附加绝缘。

（2）采用先进技术的传统典型产品主要介绍通过采用新组件和紧密跟踪市场需求的新产品，如采用自配合电器——控制与保护开关（CPS）的低压成套开关设备，采用表面安装技术——熔断器开关的动力柜，满足消防要求——终端双电源切换的消防配电设备，采用断路器——后续熔断器的高层商住楼宇的动力柜，有趋向代替传统热继电器的智能型电动机综合保护器在成套开关设备中的应用等。

（3）随着成套设备各种新材料的问世，带动了成套设备朝着环保、低耗、高性能、低成本发展。如采用优质铝材料及铜覆铝型空气绝缘母线槽（产品造价降低 30%~50%）。在对欧盟的贸易中，要重视塑料制品材料的可降解性。

（4）成套设备要不断地适应用户恶劣环境，需符合 IEC 6228、GB/T 20641 低压成套开关设备和技术的一般要求，市场销售的壳体应规定壳体的耗散功率。

（5）考虑到我国目前大多数企业是生产型组装型工厂，对工艺的提高是当务之急，为此介绍了生产过程中企业的工艺规程。

（6）面对交流电动机的起动，对大多数成套开关设备来说，都是典型方案，如直接起动、星—三角转换起动、自耦降压起动、频敏起动等。近些年利用电力电子开关组成的软起动被广泛采用，并进入成套开关柜可选方案中，这是一大技术进步。本卷开辟专章介绍软起动控制技术基础、软起动应用技术基础、软起动控制设备工程应用、软起动控制设备应用电路方案、磁控式软起动的应用和中压电动机软起动。

（7）本卷介绍的电气连接技术，由于考虑到电气辅件在成套设备中的工作环境，制造电气辅件的材料绝大部分为塑料材料，这些塑料包括热塑性塑料及热固性塑料：有酚醛类，也有 PVC 类、尼龙类、聚酯类及乙烯类等，因此对辅件用塑料材料需提出基本要求。因为电气辅件是安装在成套设备中，其正常工作条件、介电性能要与成套设备一致。其他共性要求还有耐低温、耐交变湿热、耐温度变化、耐开裂、浸泡、耐抗力、着火危险、弯折、相比漏电起痕指数、文字符号耐久性检查等。在各种接线辅件中，以导体的直接连接技术应用最广泛，而在各种接线辅件的使用和产量最大的是接线端子排、连接器（接插件）、端头（线鼻子）。直到 20 世纪末，出现了母线无孔连接技术。它是专用于成套设备和配电工程中母排布线，母线与分支母线快速无孔连接件。其特点是工艺简单，连接可靠、接触面积大，成本低廉，节能降耗。显然这是一种可推广的新技术。以后随着无孔母线连接的应用，出现了一种母排适用技术（也称组件表面安装技术）。它是将低压电器元器件，如刀开关、刀熔开关设计成能直接安装在母线上的安装形式。可做到同时完成安装支撑与电气连接两个功能（对组件来说，可做到电缆进、母排出，母排进、电缆出）。若安装其他组件，如塑壳断路器，可以配用一种专用的转换连接器。这种母线适用技术在成套设备中的推广应用，带来了革命性变革，出现了采用母线适用技术的配电柜（箱）。当今随着成套设备电流等级的扩大和新型安装方式的出现，引入了大电流端子（截面达 300mm²、电流达 630A）。这种端子的优点是：提升了端子的电流等级，可实现分线（包括电缆不切断分线），组态灵活，实现防火设备用、铜铝过渡，较强的热稳定能力，短路强度达 120kA/mm²。在当今欧洲及北美，对电器用塑料制品的环保与污染提出了更高的要求（欧盟 BOHS 指令、EEC 条款和美国 UL 要求的禁止使用六种有害物质：镉、铅、汞、六价铬、多溴联苯、多溴联苯醚等），随着我国电气辅件产品进入国际市场，满足和符合这些要求是必不可少的，介绍这些要求也是本卷的内容。

2.3 低压电器与成套设备可靠性技术的主要内容

2.3.1 可靠性基础理论

包括失效密度函数及累积失效分布函数等内容。

2.3.2 低压电器可靠性特征量

包括不可修复产品的可靠性特征量（可靠度、累积失效概率、失效率、平均寿命、寿命标准离差、可靠寿命、中位寿命、成功率）；可修复产品的可靠性特征量（平均故障率、平均无故障工作时间、有效度、平均修复时间、修复率、可靠度）；失效密度函数与可靠性特征量之间的关系；常见的失效分析类型及其估计与检验方法；可靠性特征量的估计（点估计、区间估计、图估计）等内容。

2.3.3 低压电器可靠性抽样检查

包括抽样检查方案的分类、抽样检查的基本理论（抽样检查方案的接收概率、抽检特性曲线及参数、抽样检查方案的确定方法）、指数分布时电器产品的可靠性抽样（失效率抽样、平均寿命抽样、可靠寿命抽样、平均寿命序贯抽样）、威布尔分布时电器产品的可靠性抽样（平均寿命抽样、可靠寿命抽样）等内容。

2.3.4 低压电器可靠性试验理论与方法

包括可靠性试验的种类、可靠性筛选试验、可靠性环境试验、可靠性测定试验与可靠性验证试验、可靠性寿命试验、加速寿命试验等内容。

2.3.5 低压电器可靠性设计

包括可靠性预计(系统的可靠性框图、串联系统的可靠性预计、并联系统的可靠性预计、 n 个取 k 系统的可靠性预计、串并联系统的可靠性预计、桥式系统的可靠性预计等),可靠性分配(简单的可靠性分配方法、根据相对失效率进行可靠性分配、根据各组成单元的重要度及复杂度进行分配、花费最小分配法等),可靠性技术设计(降额使用、冗余设计、耐环境设计、耐热设计、耐振设计、参数设计、容差设计等),电器触头的可靠性设计,机械构件的可靠性设计(基于应力—强度干涉模型的可靠性设计的基本原理、电器中杆件的可靠性设计、电器中弹簧的可靠性设计);电器电磁系统可靠性设计(电器电磁系统可靠性设计的基本原理、电器电磁系统可靠性优化设计)等内容。

2.3.6 典型电器的可靠性指标与考核方法

包括控制继电器、接触器、小型断路器、剩余电流动作保护器、低压断路器、过载继电器等电器产品的可靠性指标与考核方法等内容。

2.3.7 低压成套开关设备与控制设备可靠性指标与分析

包括低压成套开关设备与控制设备的可靠性指标体系,以及低压成套开关设备与控制设备的故障树分析方法等内容。

2.4 低压电器试验与检测技术的主要内容

2.4.1 低压电器试验中测量的基本知识

包括测量的基本概念、测量误差、误差的统计处理、仪器仪表误差和准确度等内容。

2.4.2 试验参数的测量

包括电量参数的测量及非电量参数的测量等内容。

2.4.3 低压电器试验的计算机测试技术

包括电器试验的一般技术、断路器特性试验测试技术、接触器寿命试验技术、漏电保护器的漏电特性测试技术及过载继电器的过载特性测试技术等内容。

2.4.4 电器试验参数高速采集与处理技术

包括电器试验参数采集与处理技术的概况、电器试验的测试技术及电器试验参数高速采集与处理系统等内容。

2.4.5 低压电器特殊参数测量技术

包括接触电阻的测量技术及电器电弧动态拍摄技术等内容。

2.4.6 低压电器试验的常用仪器仪表

包括指示仪表、数字仪表、比较式仪器、扩大量程装置、记录仪器及频率谐波分析仪等内容。

2.4.7 低压电器试验及常用设备

包括电源设备、负载阻抗、温升试验及设备、介电性能试验及设备、动作特性试验及设备、短路试验及设备、材料试验及设备、环境试验设备、电磁兼容试验及设备(电磁发射试验设备、电磁抗扰度试验设备等)及其他试验设备等内容。

2.5 低压成套开关设备与控制设备试验与检测技术的主要内容

(1) 低压成套开关设备与控制设备的常规试验。包括温升试验、介电性能试验、短路耐受强度试验、保护电路有效性验证、电气间隙和爬电距离验证、机械操作试验、通电操作试验,以及封闭式低压成套设备在内部故障引起电弧情况下的试验等内容。

(2) 低压成套开关设备试验。包括适用范围、试验依

据、试验项目(型式试验及出厂试验)等内容。

(3) 母线干线系统试验。包括适用范围、试验依据、试验项目(型式试验、出厂试验)及试验方法等内容。

(4) 配电板试验。

(5) 建筑工地用成套设备(ACS)试验。

(6) 动力配电网用电缆分线箱(CDCs)试验。

(7) 低压成套开关设备和控制设备空壳体试验。

(8) 高(低)压预装式变电站试验。

(9) 交流电动机电力电子软起动装置试验。

(10) 低压直流成套开关设备和控制设备试验。

(11) 自耦减压起动控制装置试验。

(12) 低压无功功率补偿装置试验。

(13) 低压无功补偿控制器试验。

(14) 节电装置试验。

(15) 电控配用电缆桥架试验。

(16) 低压成套辅助设备试验。

3 低压配电工程的发展展望

3.1 低压电器的发展展望

(1) 智能化、可通信。开发智能网络配套用电器产品,配合低压成套电器行业开展智能化、可通信低压电器产品的研制与推广。

(2) 加速我国第四代低压电器产品研发与推广。上海电器科学研究所(集团)有限公司已与国内某些骨干企业合作进行第四代低压电器第一批四个系列产品研发工作,第四代产品研发重点放在国外近年来发展最迅速的几大类低压电器上。

1) 配电电器方面重点发展新一代万能式断路器(框架断路器)和塑壳断路器两大系列产品。

2) 控制电器方面重点发展电动机保护器与控制类电器,包括电动机保护塑壳断路器、交流接触器、过载继电器(热双金属片式、电子式)、控制与保护开关电器。

(3) 继续发展并大力探索各类新型电器。包括电子电器(如电子式电动机保护器、软起动器)、真空电器(低压真空断路器、真空接触器)、低压电涌保护器及电弧故障保护开关等。

(4) 根据市场需求对部分第三代产品进行二次开发,以进一步提高性能和性价比。

(5) 发展新一代经济型产品。

3.2 低压成套开关设备与控制设备发展展望

低压开关设备与控制设备发展展望可归纳为以下几个方面:

(1) 具有系统智能化、数字化、网络化的低压成套开关设备和控制设备应用和普及。由天津电气传动设计研究所与国内一些骨干企业合作研制的具有以上功能的智能化低压成套开关设备,目前已在推广应用。

(2) 低压电网更加注重电能质量、谐波治理。由于世界上能源界、科学技术界、企业等对电能质量认识上的提高,对电力网供、需之间起重要桥梁作用的低压成套开关设备的科研、设备制造、运行管理等诸部门对电能质量的认知,也由单项物理指标补偿(电能运行监控指标——无功功率、功率因数、谐波、电压波动与中断等),提升为综合考虑为电能质量补偿的新概念、新视角、新思维,向用户提供新型的装备。站在电能质量角度看待各类电能质量的缺陷,均可归纳为电压、电流两项最基本的指标。因此讨论电能质量的补

偿均可划定为电压质量补偿和电流质量补偿。这样可充分利用现代电力电子技术,微电子技术,自动化技术,信息技术,网络技术,补偿的新理论,应用化软、硬件等高新技术手段,大大改善和提高低压电力网最终的补偿效果,向用户提供技术新颖、质量优良、能耗低、管理网络化的性价比高的新装备。同时也为低压成套开关设备行业,向高新技术企业方向发展迈出强有力的步伐,摆脱多年低价格无序竞争局面,开拓了思路,坚定了信心,指出了方向。

(3) 保护电气成套组合电路多样化。

(4) 新组件、新元件不断涌现,促进成套设备功能、性能的不断跃升。

(5) 新材料不断问世,带来环保、节能、成本降低的综合效益。

(6) 成套开关设备多功能化和现场组装化与建筑电气的配合进入快速发展期。

(7) “成套开关设备空壳体”国家标准的颁布实施,必将促进成套开关设备壳体供应商的产品质量提高和壳体制造

业竞争发展。

(8) 对高端产品的开发、生产、进入市场、出口都已达到一定水平。

(9) 一些有突出应用前景的产品,要随着用户需求及市场发展要不断更新创新和改进。如高(低)压预装式变电站,它的防火问题、现行装置中的扩容问题、工作中的维修问题都提到日程上来。

(10) 国内成套设备行业更加注重企业技术创新中心的建设,拥有自有知识产权是企业增加效益,为今后扩大生产市场占有率的最有效途径,也是今后评价企业的最突出因素之一。

(11) 低压成套开关设备和控制设备与绿色环保:

1) 节省、有效使用自然资源、降低能源损耗,使设备受外界影响和对外界影响小。

2) 尽量减少危险材料的使用,减少材质的体积和重量,选择极少毒性材料,使用可回收材料。

3) 采用新技术降低能耗,进行环境评估(EIME)。

参 考 文 献

- [1] Klaus Kosack, 低压开关电器和开关设备手册. 胡明忠, 胡沫非, 译. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [2] Gunter G. Seip, 电气安装技术手册. 胡明忠, 胡沫非, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

第2篇 低压电器

主编单位：上海电器科学研究所(集团)有限公司

西安交通大学

中国质量认证中心

常熟开关制造有限公司(原常熟开关厂)

主 编：何瑞华 尹天文 陈德桂 刘常生 唐春潮

编委会秘书长：胡景泰

主 审：梁顺林

编写人员：陈 超 (常熟开关制造有限公司)

陈德桂 (西安交通大学)

陈培国 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)

方国生 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)

管瑞良 (常熟开关制造有限公司)

何瑞华 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)

胡建平 (常熟开关制造有限公司)

胡景泰 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)

季慧玉 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)

蒋容兴 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)

李兴文 (西安交通大学)

厉无咎 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)

林海欧 (上海电器陶瓷厂有限公司)

刘常生 (中国质量认证中心)

刘 健 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)

刘志远 (西安交通大学)
纽春萍 (西安交通大学)
曲德刚 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)
阮於东 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)
宋伟宏 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)
唐春潮 (常熟开关制造有限公司)
田新疆 (厦门宏美电子有限公司)
万绍尤 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)
王碧云 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)
王季梅 (西安交通大学)
王卫成 (常熟开关制造有限公司)
韦亚兰 (常熟开关制造有限公司)
薛吉 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)
尹天文 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)
曾萍 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)
张南法 (常州市剑捷防雷电子有限公司)
张扬 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)
张玉青 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)
章永孚 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)
赵文华 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)
周积刚 (上海电器科学研究所(集团)有限公司)

第1章 综 述

1 低压电器用途与分类

1.1 低压电器定义与范围

低压电器通常是指交流电压 1000V (我国煤矿井下配电电压一般为 660V、1140V, 为此我国低压电器电压范围延伸至 1200V)、直流电压 1500V 及以下配电和控制系统中从变压器至负载 (如电动机) 之间的电器设备。

它对电能的输送、分配与使用起着接通、分断、保护、控制、调节、检测及显示等作用。

1.2 低压电器分类与用途

1.2.1 传统分类及其扩展

传统低压电器根据它在电气线路中所处的地位和作用可归纳为配电电器和控制电器。国外从 20 世纪 80 年代, 我国从 20 世纪 90 年代开始在低压终端用电系统中逐步发展了一批外形、结构、安装等具有共同特征并自成体系的低压电器, 通常称为终端电器。以下按上面三大部分低压电器分别介绍其主要品种及其用途。

1.2.1.1 配电电器

配电电器一般可分为 4 大类产品。

(1) 低压断路器。

1) 主要品种: 万能式断路器、塑料外壳式断路器、剩余电流动作断路器、直流快速断路器、真空断路器等。

2) 用途: 主要用作低压配电线路过载、短路或欠电压保护, 也可作不频繁接通和分断电路。剩余电流动作断路器兼有漏电保护功能。

(2) 低压开关、隔离器、隔离开关及熔断器组合电器。

1) 主要品种: 开关、隔离器、隔离开关、开关熔断器组、熔断器组合电器、隔离器熔断器组、隔离开关熔断器组、熔断器式开关、熔断器式隔离器、熔断器式隔离开关。

2) 用途: 主要用作低压配电系统隔离, 以保证低压配电系统中其他电器设备维修时安全。对开关类电器能接通、分断额定电流, 对熔断器组合电器还具有短路和过载保护功能。

(3) (双电源) 转换开关电器。

1) 主要品种: 自动转换开关电器、手动转换开关电器、遥控转换开关电器。

2) 用途: 用于两路电源的转换, 保证重要负载连续供电。对 CB 型自动转换开关还具有过电流保护功能。

(4) 低压熔断器。

1) 主要品种: 专职人员用熔断器、非熟练人员用熔断器、半导体器件保护用熔断器 (快速熔断器)。

2) 用途: 用作低压配电线路或设备的短路和过载保护。

1.2.1.2 控制电器分类

按传统分, 控制电器分为 8 大类产品。

(1) 接触器。

1) 主要品种: 交流接触器、直流接触器、真空接触器、半导体接触器。

2) 用途: 主要用于频繁接通和分断电路, 并与适当的热继电器或电子式过载继电器 (电动机保护器) 组合, 以保护操作中可能发生过载的电路。

(2) 起动器。

1) 主要品种: 全电压直接起动器、星—三角起动器、自耦减压起动器、变阻式转子起动器、半导体起动器 (含软起动器)。

2) 用途: 主要用作各类交流电动机起动、停止和正反向控制。

(3) 控制电路电器。

1) 主要品种: 中间继电器、时间继电器、万能转换开关、位置开关 (行程开关)、按钮、主令控制器、接近开关等。

2) 用途: 主要用作接通和分断控制电路, 以发布控制命令或用作程序控制。接近开关可作为检测元件并输出动作命令。

(4) 控制器。

1) 主要品种: 凸轮控制器、平面控制器。

2) 用途: 主要用于电气控制设备中转换主电路或发电机励磁回路的接法, 以达到电动机起动、换向和调速的目的。

(5) 变阻器、电阻器。

1) 主要品种: 励磁变阻器、起动变阻器、频敏变阻器、铁基合金电阻。

2) 用途: 主要用作发电机调压及电动机平滑起动和调速或改变电路参数, 变电能为热能之用。

(6) 电磁铁。

1) 主要品种: 起重电磁铁、牵引电磁铁、制动电磁铁。

2) 用途: 用于起重、操纵或牵引机械装置。

(7) 调整器。

1) 主要品种: 碳阻式调整器、磁放大器式调整器。

2) 用途: 使发电机输出电压稳定在一定范围内。

(8) 信号灯。

控制电器中, 第 4~8 类产品, 目前尚无 IEC 标准。我国仅制定了行业标准, 尚无国家标准。为此按标准体系分类中不包括上述 5 类产品。在以下低压电器产品介绍中, 也不包括这些产品。

1.2.1.3 终端电器

国际上终端电器品种繁多, 可分为模数化终端保护、控制、计量、自动化元件等四大类产品。考虑低压电器范围及我国目前应用状况, 主要有 3 大类产品。

(1) 家用及类似用途电器。

1) 主要品种: 小型断路器、模数化剩余电流保护电器。

2) 用途: 作为终端配电系统导线和家用电器过载和短路保护、漏电及人身触电保护。

(2) 模数化熔断器组合电器。

1) 主要品种: 模数化熔断器式隔离器、模数化开关熔断器组、熔断体等。

2) 用途: 用于终端配电系统过载和短路保护。

(3) 终端组合电器。

1) 主要品种: 非熟练人员用终端组合电器、熟练人员用终端组合电器。

2) 用途: 主要作为终端用电系统配电、保护与控制, 可以不频繁接通与分断电路。

1.2.2 按标准体系分类

(1) 低压开关设备与控制设备对应于 IEC 17B 的主要产品按标准分类如下:

GB 14048.2 低压断路器

GB 14048.3 低压开关、隔离器、隔离开关及熔断器组合电器

GB 14048.4 机电式接触器和电动机起动器

GB 14048.5 机电式控制电路电器

GB 14048.6 交流半导体电动机控制器和起动器

GB 14048.9 控制与保护开关电器

GB 14048.10 接近开关

GB 14048.11 转换开关电器

GB 17701 设备用断路器

(2) 家用和类似用途电器, 对应于 IEC 23E, 主要分为两大类产品:

GB 10963 家用和类似场所用过电流保护断路器 (小型断路器)

GB 16916 家用和类似用途的剩余电流动作断路器 (RCCB)

GB 16917 家用和类似用途的带过电流保护的剩余电流动作断路器 (RCBO)

(3) 低压熔断器, 对应于 IEC 32B 主要分为三大类产品:

GB 13539.2 专职人员使用的熔断器

GB 13539.3 非熟练人员使用的熔断器

GB 13539.4 半导体设备保护用熔断器

(4) 低压浪涌保护器 (SPD), 对应于 IEC 37A。

1.2.3 其他主要分类

(1) 按动作方式分:

1) 机械动作电器 (有触点电器), 又可分为自动切换电器和非自动切换电器。

2) 非机械动作电器 (无触点电器)。

(2) 按灭弧介质分: 空气电器和真空电器。

(3) 按有无通信功能分: 一般低压电器和可通信低压电器。

(4) 按功能不同分: 标准型、多功能型、智能型。

2 低压电器主要特征

2.1 低压电器基本特征

(1) 低压电器量大面广, 据统计发电设备产生的电能 80% 以上通过低压电器传输而消耗。低压电器在电力系统中一般作为配套设备 (在电工行业中作为基础件), 其需要量很大。据统计, 每增加 1 万 kW 发电设备约需要 6 万~8 万件低压电器与之配套。低压电器广泛用于国民经济各行各业低压配电与控制系统中, 也用于千家万户用电设备的控制与保护。低压电器产品质量及其可靠性等造成产品工作失效, 会导致整个线路故障或成套设备无法工作, 甚至造成设备和人身事故。它在国民经济发展和人民日常生活中有着不可取代的地位。

(2) 低压电器结构上种类繁多, 没有固定的模式。但一般

具有两个相同的基本部分: 一是感受部分, 它接受外界信号并发出动作指令, 如断路器中脱扣器, 接触器、继电器中的电磁系统, 手控电器中的手柄等。二是执行部分, 它根据感受部分发出的指令完成电路的开关动作, 如触头系统。部分电器还有中间传递部分, 如断路器中的操动机构, 它的任务是把感受和执行两部分联系起来, 使它们协调一致, 按要求动作。

(3) 低压电器运行时存在着电、磁、光、热、机械等能量的转换, 这些能量转换大多是暂态过程, 许多参数变化又是非线性的, 它使低压电器的理论分析变得极为复杂。因此, 低压电器设计至今尚无系统的定量计算方法。目前产品设计除部分借助理论分析和计算推导外, 还必须依赖成熟的经验数据并通过试验予以验证。计算机辅助设计和最近发展起来的虚拟样机技术、计算机仿真和现代测试技术, 为低压电器提供了更为科学的研发手段和设计方法。但是, 低压电器新产品设计仍不能完全摆脱经验数据和试验验证。

(4) 低压电器产品一般成系列大批量生产, 每一系列产品往往有很多规格品种, 必须充分注意同一系列产品标准化与通用化。这样有利于组织大批量生产与管理, 对保证产品质量、降低制造成本、节省材料等均有重大意义。同时, 也有利于用户的选用、安装与维护。为适应大批量生产需求, 低压电器产品整体结构与零、部件设计时, 必须充分考虑制造工艺要求。从低压电器制造要求来说, 生产单个和一批合格产品并不困难, 难的是生产成千上万台, 甚至几十万台、上百万台产品时, 保持其性能一致性与可靠性。为此, 对低压电器生产管理、生产环境与制造工艺要求很高, 对材料性能、精度及性能稳定性要求亦很高。低压电器除确保零部件模具精度外, 生产与装配过程中的工装夹具、生产装配线、在线检测也显得十分重要。

(5) 由于上述诸多因素, 低压电器产品开发周期与推广时间较长。同时, 低压电器生命期也比较长。重要系列产品的更新换代周期一般在 10 年以上。

2.2 配电电器主要特征

配电电器负责电能的输送、分配以及线路故障时的保护, 其主要特征如下:

(1) 配电电器不需要频繁操作, 因此配电电器不需要很高机电寿命, 一般为数千次。国外最新一代配电电器机械寿命已达数十万次。配电电器虽然机电寿命 (或操作循环次数) 不高, 但实际使用寿命 (以时间计) 较长。在低压电力系统中配电电器一般不需要频繁更换。

(2) 具有过电流分断能力的配电电器, 一般应具有较高短路电流分断能力, 包括短时耐受电流。这类配电电器除外壳与基座外, 结构上分为三个主要部分: 触头灭弧系统、操动机构、脱扣器, 而且产品结构较为复杂。当线路发生故障时, 能及时检测故障信号, 并快速动作, 分断电路。在分断电路过程中往往产生强烈的电弧并伴有爆炸声。

(3) 具有隔离功能的配电电器在主触头分离时, 应具有良好的绝缘性能, 以确保维修人员安全。对不承担过电流分断的配电电器, 当线路故障时应具有短时耐受电流的能力。在短路电流分断以前, 主触头不应弹跳与熔焊。

(4) 承担双电源转换的配电电器, 当主电源发生故障或其他原因导致不能正常供电时, 应能快速、可靠转换至备用电源。对部分重要负载, 除主电源故障外, 其他故障不应跳闸。

2.3 控制电器主要特征

控制电器主要功能是根据控制对象工作要求频繁接通与

分断电路,部分控制电器还用于控制对象的各种故障保护。其主要特征如下:

- (1) 控制电器品种、规格繁多,结构与性能各异。
- (2) 控制电器一般需频繁接通或分断正常工作电流,所以控制电器具有很高机电寿命,但其更换频度一般高于配电电器。
- (3) 控制电器一般不分断短路电流,其触头开距较配电电器要小一些。产品结构也较为简单,一般没有复杂的机械操动机构,触头灭弧系统也简单一些。但控制电器必须具有与短路保护电器协调配合的能力。
- (4) 控制电器动作一般有机电信号和电气信号两种驱动方式。对机械信号驱动的控制电器(如按钮、转换开关)结构十分简单,通常驱动信号通过连杆直接带动触头运动,驱动信号消除后由反力弹簧使触头回复原状态。对电气信号驱动的控制电器,如接触器、继电器操动机构一般为电磁系统,驱动信号使电磁系统动作并通过连杆带动触头运动。驱动信号消除后通过反力弹簧使电磁系统和触头复位。

2.4 终端电器主要特征

终端电器是用于低压电力系统末端的电器。随着终端用电设备不断发展与创新,从20世纪80年代开始,国内外出现了一批终端配电、控制、计量等电器设备。这些电器具有许多共同的特点,自成系统,并逐渐发展成为低压电器重要组成部分,其主要特征如下:

- (1) 外形尺寸模数化。终端电器宽度一般以9mm和12mm为模数,长度与高度相同,便于拼装成各类组合电器。
- (2) 产品安装导轨化。传统低压电器产品一般采用螺钉安装,而终端电器一般采用导轨安装,使产品安装、维修十分方便。
- (3) 产品外形设计艺术化。终端电器产品相当一部分安装在家庭或办公室内,其外形美观显得十分重要。为此,对终端电器外形设计提出了艺术化要求(相当于艺术品)。
- (4) 功能组合化。各类终端电器根据终端用电系统和用电设备的要求组合在一起,实现过载、短路、漏电(触电)、过电压、计量、控制等功能,并要求相关电器保护特性协调一致。
- (5) 终端电器外形尺寸较其他同容量低压电器要小一些,但零部件加工精度要求较高。

2.5 低压电器型号含义及其唯一性

2.5.1 低压电器型号含义

低压电器是机械工业量大面广的基础元件,凡是用电的地方都离不开低压电器。其产品性能和质量关系到国民经济每个领域,乃至千家万户的可靠用电和生命财产安全。

低压电器产品系列、规格、品种繁多,其参数、特性、指标十分复杂。为了最简易地表述其特征,每一系列产品采用特定的系列型号进行表示。每一系列中不同规格、不同品种的产品(包括派生产品)在产品型号标注上均有区分。所以低压电器某型号就标志某一个特定产品,它既确定了产品的技术参数、性能指标、产品特性,又确定了产品结构形式、外形尺寸、安装尺寸,对可通信低压电器来说还涉及通信内容和通信规约。另外,不同企业由于制造工艺、装备与管理水平不同,使看似相同的产品质量差异甚大。所以,低压电器型号既是某一特定产品的标志,也是低压电器产品质量标识。

2.5.2 低压电器型号的唯一性

由于低压电器型号特定含义以及我国低压电器制造厂众多,同类产品重复生产十分普遍的情况,因此必须保持低压电器型号唯一性。

(1) 从工程设计看,低压电器型号是某一个特定低压电器产品综合特征的标志,是全国电气工程设计中正确、合理选用低压电器的必备条件。设计院在设计某一电力系统时,往往涉及成百上千个低压电器产品,在工程图上无法全部列出每一个产品各项要求,只能标志产品型号。如果低压电器型号不保持唯一性,同一型号出现不同产品。那么全国设计院工程设计时将带来极大困难,并无法保证电气系统设计正确性与合理性。最终会严重影响电力系统可靠运行和人身安全,并将产生许多意想不到的隐患,其后果十分严重。

(2) 从保护知识产权看,低压电器型号已成为企业品牌与知识产权一部分,保护低压电器型号将有力促进低压电器行业技术进步。低压电器优秀企业为扩大本企业产品影响,每年花费了大量人力、物力和财力,不断提高产品知名度。有的企业甚至花费了数千万投入,创造了自己特定的型号产品,有些产品还被评为中国名牌,其型号的影响远远超过了该厂商标的影响,所以低压电器产品型号实际上已成为该企业品牌与知识产权一部分。如果其他企业可以随意使用他人产品型号,那么优秀企业品牌优势必将受到严重影响,企业之间低水平重复、压价竞争将更趋严重,进而极大阻碍低压电器行业技术进步。

(3) 从维护使用部门和消费者利益角度,也必须保护低压电器型号唯一性。对结构与性能相似的产品,优秀制造商为了创自己的品牌,在关键部件设计、原材料选用、制造工艺等方面均下了很大工夫以保证其产品性能与质量。使看似相同的产品其质量与可靠性相差甚大,所以低压电器型号实际上已成为低压电器产品的质量标识。优秀企业著名产品的型号往往成为那些不具备产品开发能力、技术水平低、工艺装备差、管理水平落后企业的仿冒目标。如果著名企业的产品型号可以随意采用,那么低压电器假冒伪劣现象将难以制止并将越演越烈。其结果必将误导用户,影响使用部门和消费者利益。

(4) 从行业管理角度,随意使用低压电器型号,必将造成我国低压电器行业极大混乱,既不利于用户正确选用,也不利于低压电器行业健康发展。

3 我国低压电器产品现状

3.1 我国低压电器产品总体情况与技术特征

从20世纪50年代至今半个世纪里,我国共开发了三代低压电器约600多个系列产品,目前低压电器市场仍处于三代同堂。

第一代产品:从20世纪50~70年代中期,共开发了近400个系列产品。基本上满足了建国初期国民经济发展的需要。这批产品总体技术水平相当于国外20世纪50~60年代水平。其主要特征是产品体积大、性能指标低、功能单一。其中大部分产品由于市场原因以及产品性能落后,不符合IEC标准等原因已经淘汰。目前生产的这一代产品约60个系列,其产值约为低压电器行业总产值10%~15%。随着低压电器新技术、新产品不断发展,以及低压电器主要原材料价格居高不下,这批产品由于耗材、耗能终将在不久的将来被全面淘汰。

第二代产品:1975~1990年,通过自行开发、技术引

进、夺标攻关完成了低压电器更新换代,共125个系列产品。其总体技术水平相当于国外20世纪70年代末、80年代初水平。其主要技术特征是产品性能较第一代产品有相当提高,体积明显缩小,保护功能逐步完善,产品性能符合国家标准和IEC标准。随着第一代产品逐步淘汰,第二代产品绝大部分已成为低档产品(或经济型产品),目前市场占有率约为35%~40%。

我国第三代产品研发伴随着低压电器相关新技术不断发展而开始的,特别是电子技术快速发展,微处理器逐步在低压电器中应用,使低压电器开始具有智能化功能。同时,低压电器新技术(如灭弧技术)以及新材料、新工艺有了新的突破,使低压断路器分断能力及可靠性进一步提高。为了更好地满足国民经济发展和市场需求,我国一批优秀企业与上海电器科学研究所联合发展了我国第三代低压电器。主要包括以下8大类产品:智能化万能式断路器、高性能小型化塑壳断路器、模块化交流接触器、电子式电动机保护器、软起动器、低压真空断路器、双电源自动转换开关、控制与保护开关电器。第三代低压电器主要技术特征是:高性能、小型化;电子化、智能化;模块化、组合化。与上述产品研发同时,国外主要低压电器制造商相继进入中国市场,在中国建立了一批低压电器制造厂,并把20世纪80年代中期~90年代中期产品引入中国市场。上述两部分近100个系列产品构成了我国第三代低压电器。这批产品从20世纪90年代中期开始投放中国市场,产量不断增加,已成为我国低压电器高档产品。产值约为行业总产值50%。

3.2 我国新型低压电器发展与应用

20世纪70~80年代新型电器主要包括电子电器、限流电器、漏电电器、真空电器。

20世纪90年代新型电器主要包括智能化电器、终端电器、控制与保护开关电器、双电源自动转换开关等。

21世纪初新型电器主要包括可通信网络化电器、绿色电器等。

上述大部分新型电器的诞生与电子技术发展有关。电子技术在低压电器中应用是从时间继电器、漏电电器、断路器脱扣器等产品开始的。由于电子元件可靠性以及价格等原因,很长一段时间电子电器在低压电器行业中发展与应用不快。随着电子元件性能与可靠性不断提高,价格逐步回落,特别是微处理器在低压断路器中应用,诞生了智能化电器,充分体现出电子技术强大生命力,产品很快被市场认可。从此,电子技术在低压电器中应用得到迅速发展。

现场总线技术在低压电器中应用也是在这样的形势下开始的。微处理在低压电器中的应用使低压电器开始具有智能化功能。但是,单一智能化电器在低压配电与控制系统中很难充分发挥其作用。如DW45智能型万能式断路器,目前已形成年产15万台以上,这些断路器大部分仍作为三段保护。要充分发挥智能化电器的作用与功能,必须将智能化电器形成网络,并与上位机通信,实现监控。传统并行连接的通信方式将使网络系统十分复杂,安装、调试、维护与更改设计十分不便,系统成本与运行成本很高,从而难以在低压配电与控制系统中应用。各种开放式现场总线技术不断发展,使上述应用成为可能。另外,为了提高电力系统自动化程度、功能扩展以及运行可靠性等因素,低压配电与控制系统实现网络化势在必行。系统实现网络化后,对低压电器提出了双向通信要求。

我国第三代低压电器主要产品已具有双向通信功能,能

与国际上多种先进的、开放式现场总线连接。如:可通信智能型万能断路器、可通信智能型塑壳断路器、可通信双电源自动转换开关、可通信控制与保护开关电器、可通信电动机保护器、可通信软起动器等。上述可通信低压电器与通信适配器、网络延伸器、电量监控仪、模拟量、数字量I/O模块等配套产品可以构成智能网络低压配电与控制系统,使低压电器与系统功能大大扩展,并使低压成套装置与系统发生重大变化。如传统电动机控制中心在现场总线系统中可以取消,系统中电动机控制单元直接安装在控制对象电动机旁边。各种电量参数和控制信号通过现场总线与上位机连接,使中央控制室能实时了解控制设备运行情况并对其进行监控。据专家分析,采用现场总线后,系统成本可降低40%以上。

随着电子技术不断发展,除机电一体化产品外,纯电子电器产品也不断得到发展与应用。近几年来发展最快、最具代表性的电子电器为电子式电动机保护器(电子式过载继电器)和软起动器。电子式电动机保护器已在很多场合取代热继电器,使保护功能大大扩展,提高了电动机运行可靠性。软起动器性能明显优于传统星—三角起动器、自耦减压起动器、变阻式转子起动器等产品。在节能成为我国国民经济发展重要产业政策的今天,软起动器必将获得广泛应用并取代各类传统减压起动器。

除了电子电器、智能电器、可通信电器之外,近十年来发展的其他新型电器主要有低压真空断路器、控制与保护开关电器(CPS)、双电源自动转换开关(ATS)和低压浪涌保护器等产品。低压真空断路器具有电弧不外露、分断能力不受外部环境影响、安全可靠、电寿命长、免维护等优点。该产品特别适用于无人值班变电站、箱式变电站、操作相对频繁以及使用环境较恶劣的场合。控制与保护开关电器(CPS)是一种新型集成化程度很高的组合电器,它集断路器、接触器、热继电器(或电子式电动机保护器)、隔离器等产品功能于一体。CPS产品的诞生与应用使电动机控制中心内部接线大大简化、体积缩小,集成化程度明显提高。它为低压控制成套设备实现小型化,提高低压控制系统运行可靠性具有重要意义。自动转换开关电器(ATSE)主要用于紧急供电系统,它可将负载从一个电源自动切换至另一个电源(备用)的开关电器,以确保重要负荷(一、二类用电负荷)连续、安全、可靠运行。从20世纪90年代开始,大型建筑物大量兴起,工业自动生产线普遍应用,医院、银行、通信、军事等特殊行业对供电连续性要求越来越高。因此,从20世纪末开始,自动转换开关已成为众多用户关注的又一个新型电器,近年来需求量不断增加。

随着电子技术、自动化技术、计算机技术、通信技术不断发展,大量高灵敏度电子产品应用于低压配电系统,特别是终端用电设备中。因此,低压浪涌保护器已成为低压配电系统,特别是终端配电系统中必不可少的产品。为了有效保护低压电力系统中各级用电设备安全,国内外电器制造厂已研制成功适应不同安装场合的各类低压浪涌保护器,并对低压防雷系统提出了整体解决方案。它正在逐步发展成为低压电器行业中一个新兴领域。

4 低压电器发展动向

4.1 低压电器现代研发技术

目前,一种崭新的研发技术正在国际上著名开关电器公司和研发中心推广,它以开关电器运行、动作和分断机理研

究为核心,并在此基础上进行新产品创新设计。这种现代设计技术包括两个内容:一个是虚拟样机技术,一个是基于现代测试技术的试验研究。

4.1.1 虚拟样机技术

长期以来,低压电器的开发主要依靠反复制样机和试验,这种传统的方法不但使开发的周期很长,并且样机制作和试验都要花费很高的成本。随着计算机仿真技术的发展,可以利用交互式图形技术在计算机屏幕上建立三维可视样机。并且,通过精确的仿真技术,使该样机具有和实际样机同样的性能。研发人员可以通过交互手段、改变样机的结构和参数,不但可使样机满足额定的技术要求,并且可实现优化设计。这种新技术就是虚拟样机技术,它可代替周期长、费钱又费力的传统方法。近年来,国际上各大公司对这项技术十分重视,并从两个方面促进了这项新技术推广与应用:一方面商品仿真软件的性能不断完善,另一方面各大公司自行开发或在商品软件上进行二次开发成为各种低压电器设计系统。

目前低压电器虚拟样机技术主要应用在以下几个方面:

(1) 低压断路器操动机构多体动力学仿真:通过操动机构仿真,不仅优化机构设计,并可获得断路器触头行程、运动速度,加速度及动作时间,它对提高断路器分断性能具有重要意义。

(2) 电器的热场与电流场的耦合仿真与温升计算:电器的温升是一个重要技术指标,长期以来依靠牛顿公式的经验计算,难以保证计算的准确性,不得不依靠试验来验证样机的性能。电器的发热具有很复杂的物理现象,热源是电流通过导体产生的,由于导体形状不规则、电流分布不均匀以及发热体散热条件的复杂性,使电器温升计算十分复杂。通过导体回路电流场和导电回路周围热场的耦合仿真,为低压电器温升计算创造了条件。

(3) 低压断路器开断电弧的仿真:本项技术的最终目的是用虚拟样机仿真计算得出断路器分断性能以代替昂贵的分断试验。为此,首先要解决开关电弧的数学模型。由于低压断路器触头和灭弧室形状不规则,使低压电器电弧数学模型十分复杂,至今尚未成熟。德国默勒公司研发中心对一个接近于微型断路器灭弧室模型进行三维仿真,已获得初步结果。

(4) 交流接触器电磁场与触头闭合过程碰撞与弹跳仿真:电磁接触器主要性能是小型化、质量轻、节能、寿命长。要达到上述要求,通过接触器电磁场、运动和应力仿真,以达到接触器磁系统和各部件优化设计。同时,通过灭弧系统仿真提高电弧驱动速度,进一步提高接触器电寿命。

虚拟样机技术是当前开发新型低压电器的关键技术,它可以缩短新产品开发周期,降低成本,实现产品优化设计。因此,这种技术已受到国际上各大电器公司的重视和应用,我国部分优秀企业、高校和研究所也开始采用本项技术。

4.1.2 现代测试技术

由于电弧数学模型至今尚未成熟,因而用虚拟样机技术优化低压电器,特别是断路器灭弧系统尚不完善。所以目前国外对开关电器灭弧室的设计采用振荡回路作为短路试验电源,以可折式灭弧室为研究样机,也可直接用试验样机采用现代测试技术,从宏观和微观两方面来评价研究对象灭弧性能的好坏。采用这一方法有两个好处:首先,以振荡回路作为短路试验电源,节约能量,不易损坏样机,可大大节省低压断路器研发成本;另一方面,现代测试技术能有效分析研究样机分断性能,找出设计中存在的问题及其原因,为新产

品改进设计提供科学的依据,从而缩短试制周期,进一步节省研发成本。

日本三菱公司为优化低压断路器灭弧系统设计,采用振荡回路和可折式灭弧室,通过快速摄像系统来观察电弧在不同条件下进入灭弧栅片的情况,研究结果可以获得电极(触头)至栅片的最佳距离,为优化灭弧系统设计提供科学依据。

4.2 低压电器产品相关新技术

随着低压电器相关新技术、新原理不断创新与发展,近年来国内外推出了一大批新型电器和新一代低压电器产品。

下面介绍与低压电器产品发展密切相关的主要新技术。

4.2.1 低压断路器开断技术

随着低压配电系统容量不断增大,对低压断路器的分断能力提出了更高的要求。同时,为了提高配电系统供电可靠性,对配电系统主开关万能式断路器提出了 $I_{cu}=I_{cs}=I_{cw}$ 的要求,对支路保护开关塑壳断路器提出了 $I_{cu}=I_{cs}$ 的要求。为此,国外著名开关电器制造商对断路器分断技术及触头灭弧系统进行了大量研究。目前,国外主要公司新一代塑壳断路器灭弧系统除了采用磁吹外,普遍采用气吹技术。主要采用两种方法实现气吹:一种是在灭弧室内放置产气绝缘材料,利用电弧高温作用下产气提高灭弧室压力,实现气吹;另一种方法是改变单断点塑壳断路器前端灭弧室、中间操动机构和后端脱扣器传统结构,利用双断点后端密材的专门灭弧室来形成向前的气流以推动电弧进入灭弧室,同时,利用气吹的驱动力推动脱扣器动作,从而进一步提高了断路器分断可靠性。塑壳断路器双断点结构已在许多公司新一代产品上(如施耐德公司 NS 系列、ABB 公司 Tmax 系列、GE 公司 Record plus 系列)应用。经有关单位测试,双断点塑壳断路器电弧电压可达 550~680V,较一般单断点塑壳断路器电弧电压 300V 提高一倍左右。可见,双断点结构对提高开断性能非常有效。日本寺崎公司新一代万能式断路器亦采用双断点结构,除提高分断能力外,还能明显提高短时耐受电流。

4.2.2 低压配电系统选择性保护技术

我国低压配电系统目前选择性保护是不完善的,主要表现在:①塑壳断路器由于短路时触头快速拆开,一般难以实现选择性保护;②现有万能式断路器选择性保护只能在一定电流范围内实现;③终端配电系统由于小断路器快速限流分断性能,没有选择性保护。

随着电网容量不断扩大,人们对配电可靠性要求越来越高。除了故障预警、故障监控、故障排除等一系列措施外,一旦出现短路应使故障停电限制在最小范围内。为此,国内外电器制造商正在探索通过各类断路器保护功能不断完善、实现低压配电系统全范围选择性保护。这项技术主要包括以下几个方面:

(1) 新一代万能式断路器应首先实现全范围选择性保护。它的含义是即使下级断路器故障电流达到上级断路器极限短路分断电流也要实现选择性保护。为此,配电系统各级断路器必须配置区域连锁模块。它的功能有两个:其一确定短路故障点,其二发生短路这一级断路器应快速发出信号闭锁以上各级断路器脱扣器,使其不动作。当故障级断路器在规定时间内(一般不大于 50ms)无法分断短路电流时,应立即发出解锁信号让上一级断路器动作。另外,全范围选择性保护断路器必须实现 $I_{cu}=I_{cs}=I_{cw}$,以确保故障级断路器分断失败时,上级断路器可靠分断。我国第四代万能式断路

器正在实现这一功能。一旦万能式断路器实现了上述功能,配电系统就有可能在 100~200ms 以内完成选择性保护。这样既降低了断路器 I_{cw} 时间上要求,从原来 1s 可降低到 0.2s,反过来可提高 I_{cw} 值。更重要的是,整个配电系统、成套设备动热稳定性要求大大降低,从而提高配电系统运行可靠性,并可节省配电系统铜耗。

(2) 发展限流选择性保护断路器。目前,塑壳断路器均为限流型,一般没有选择性保护功能。ABB 公司新一代 Tmax 系列产品据介绍具有选择性保护功能。我国第四代塑壳断路器正在探索实现这一功能。

(3) 发展带选择性保护小型断路器,实现终端配电系统选择性保护。ABB 公司 S700 系列、海格公司 HT 系列小型断路器具有选择性保护功能。该项目已列入我国第四代低压电器发展范围,不久将问世。

4.2.3 综合智能化技术与通信技术

微处理器的应用使低压电器具有智能保护与控制功能。现场总线技术应用使低压电器成为网络电器,实现双向通信与远程监控功能。

4.2.3.1 微处理器在低压电器中应用不断扩展

微处理器首先在万能式断路器脱扣器中应用,使断路器保护更为齐全,并实现各种电量参数实时检测与显示,各类故障信号记录与储存以及内部故障自诊断等。近年来,微处理器已在塑壳断路器、双电源自动转换开关、交流接触器、电动机保护器、软起动器、控制与保护开关电器等产品上应用,使上述产品成为智能化低压电器,保护与控制功能大大扩展,产品技术含量与附加值明显提高,一批传统低压电器已成为高科技产品。

今后开发的新型智能电器已不是单一功能的电器,而是多功能的综合。如近年来国际上各大公司纷纷推出智能化交流接触器,其电磁铁采用智能控制电路,通过闭环控制达到智能合闸操作,使电磁铁吸合冲击最小,减少触头振动,大幅度提高 AC3 电寿命。有的产品还对接触器使用寿命进行状态监测,以确保接触器可靠工作。交流接触器实现智能控制同时,还能实现多种电动机保护功能,包括过载、断相、三相不平衡、接地等保护。从 20 世纪末、21 世纪初推出的新一代万能式断路器,除前面提到的基本智能化功能外,几乎都带有能量管理功能,这些智能断路器能对电网质量,如谐波分量、功率因素进行检测,同时对电能分配与使用进行监控,以保证电网质量和用电安全。

4.2.3.2 可通信与网络化是低压电器主要发展方向之一

国外最新一代低压电器产品大部分带有通信功能,能与多种现场总线连接。我国目前产品通信大多采用 Modbus 协议,与其他总线连接通过外挂通信适配器。下一代产品一般仍将采用外置式通信适配器,但部分产品将采用内置式通信接口,可直接与各类总线连接。

电器设备层现场总线系统发展趋向,主要表现在以下三个方面:

(1) 注重网络系统开放性。首先规范各类低压电器设备描述,制定统一标准,使不同厂商产品在网络上能互联、互换。另一方面允许非标第三方设备方便地接入,同时各类可通信低压电器支持连接不同总线系统,使其有更大灵活性。

(2) 工业以太网将直接与各类电器设备连接。由于工业以太网传输速率高,能在同一总线中传输不同通信协议等优点,使工业以太网已成为这一领域的技术热点。

(3) 无线通信技术已在低压电器通信中应用。它特别适合于移动通信设备上,或者不易安装通信电缆的电器设

备上,它使低压电器通信更为灵活,减少由于接线和设备移动造成的故障。

另外,低压电器设备层网络,包括低压配电与控制系统、终端用电系统等,通过与信息层以太网连接,使设备管理人员、使用人员以及制造商技术人员利用办公室电脑、笔记本电脑,甚至用手机就可以监视电器设备运行情况,并进行控制。它给电器设备的使用与维护带来了全新的理念。

4.2.4 低压电器环保技术

随着工农业的发展,环境污染日趋严重,这对大量使用的低压电器来说提出了新的要求,环保电器、绿色电器的名称应运而生。低压电器环保技术主要涉及以下几个方面:

(1) 低压电器中除金属材料外,90%以上材料是塑料。这些材料一方面应保证低压电器可靠工作,包括机械强度、绝缘性能、使用寿命等还应充分考虑环保要求:首先在低压电器使用过程中不污染环境,当塑料在电器发热和电弧烧灼时不产生有害气体;其二低压电器寿命终了时塑料可以回收。目前无污染、可回收工程塑料已开始 in 低压电器新产品中得到推广与应用。

(2) 环保触头材料研究。长期以来,由于银氧化镉有较好耐电弧侵蚀能力,在低压电器上得到广泛应用。但银氧化镉有毒,从环保要求出发,近年来以银氧化锡逐步替代银氧化镉。但是,银氧化锡接触电阻大,触头温升过高,一直是人们关注的难题。国内小容量交流接触器早就采用银氧化锡触头,但大容量交流接触器至今仍采用银氧化镉触头。目前,国际上一些触头材料生产厂都在研究通过加入添加剂来阻止触头表面 SnO_2 膜形成来降低触头温升,并已取得成效。Degussa AG 公司推出以 WO_3 和 BiO_3 两种材料复合作为添加剂的银氧化锡,不但与银氧化镉有接近的温升,并且有更好的耐磨性,使接触器电寿命更高。

(3) 消除低压电器在开断电路过程中因电弧高温使触头和周围材料产生有害气体造成对环境的污染。采用真空技术与电力电子技术是解决上述问题的重要途径。目前,真空技术在中压开关领域已具有统治地位,在低压电器中低压真空接触器已在部分应用领域,如煤矿、石化、冶金等系统中得到广泛应用。低压真空断路器近年来也有很大发展。由于真空电器触头密封在真空灭弧室中,触头开断时产生的电弧不会影响环境。尽管它的价格比一般空气断路器要贵一些,但它的优良性能和环保作用已越来越引起人们的关注。真空接触器触头不用银,在银价飞涨的今天,由于真空触头具有电寿命长、无需维护、不影响环境、节银等优点,它的应用范围必将进一步扩大。

随着电力电子技术的发展,新型电子器件如 GTO、GTR、IGBT 等第三代大功率半导体器件的出现,固态无触点开关近年来也得到很大发展。与机械式开关相比较,它是一种无电弧开关,因而有很高的寿命,并且不需要维护。从环保角度看,不会因电弧引起触头材料和塑料气化而污染环境。另外,因为没有电弧引起的发热,使这类电器的操作频率很高。

4.2.5 低压电器性能与结构的发展趋势

经过半个多世纪的发展,各类低压电器主要技术指标已达到相当高的水平。如低压断路器分断能力已达到 100~150kA,甚至更高;接触器机械寿命已达到 1000 万次以上。这些性能已满足了低压配电与控制系统的要求。今后低压电器发展不片面追求某几项主要技术指标,而是产品综合技术性能的全面提高。国外最新一代产品在提高产品性能与功能同时,十分注重产品结构上创新。结构创新除提高产品性能

外,主要研究内容与目标如下:

4.2.5.1 产品小型化研究

产品小型化既是低压电器技术水平提高的体现,也是低压成套设备小型化发展的需要。随着城市现代化建设不断发展,电网容量不断扩大,城市土地日趋紧张,对低压配电小型化提出了更高的要求。因此,低压电器小型化是低压电器主要追求目标之一。低压电器小型化除借助于相关新技术、新工艺的发展与应用外,主要依赖于结构上创新。如大容量断路器一相触头(动触头或静触头)采用多路并联结构(多达10路以上),大大减小短路时触头斥力,从而省略了传统电力补修回路。这一结构不仅明显减小断路器体积,还降低了铜耗。

4.2.5.2 提高产品使用性能和维护性能

使用性能和维护性能是各大公司新产品追求目标之一。模块化结构是提高低压电器使用性能和维护性能的重要途径。所谓模块化结构是将每一个功能部件设计成独立模块,这种功能模块安装与更换十分方便。不同功能模块可以安装在同一位置,也可以安装在不同位置。制造商根据用户要求可以任意组合,实现低压电器组合化与多功能化。模块化结构的出现,不仅使低压电器功能组合十分方便,同时使这些部件的维护变得十分方便。我国第三代产品已经使用了模块化结构,但模块化水平较低。这也是我国发展新一代产品时需要重点突破的课题。

另外,低压电器安装方式与连接方式也是结构创新的重要内容之一。近年来发展的电器产品母排安装与连接一体化结构方式就是将电器产品直接安装在成套柜内的母排上,在安装同时实现导电连接。这种新型安装与连接方式使电器安装、维护更为简便。同时,减少了导电环节,使导电连接可靠性得以提高。电器产品连接空间减小,既节省成本,又使成套装置体积明显缩小。因此,这项新技术在相当一部分电器产品中将逐步替代传统母排连接与电器安装分离的方法。

4.2.5.3 提高产品的工艺性研究

今后新产品设计要使产品零部件结构、部件安装与产品总装方式适合自动化生产要求,包括在线检测和自动检测的需要。从而进一步提高低压电器生产效率,确保产品的一致性、可靠性。

4.2.6 低压电器可靠性技术

低压电器可靠性是低压电器性能的重要组成部分,它将直接影响低压配电与控制系统可靠运行,甚至影响人身安全。低压电器可靠性技术包括低压电器可靠性设计、可靠性指标制定、可靠性考核方法、可靠性试验设备、可靠性增长等内容。低压电器产品可靠性主要涉及以下内容:

4.2.6.1 动作可靠性

我国已对低压电器主要产品交流接触器、控制继电器、塑壳断路器、小型断路器等动作可靠性开展了多年研究。并在上述产品可靠性指标(标准)、考核方法、试验设备、可靠性增长等方面取得了一系列成果。总的来说在控制电器方面相对成熟,配电电器方面尚不深入,有待进一步研究。低压电器操动机构运动与受力仿真研究以及提高相关零件加工精度是提高动作可靠性的有效措施。

4.2.6.2 分断可靠性

影响低压电器分断可靠性因素十分复杂,目前尚无定量的考核指标与考核办法。一般来说,低压电器试制完成通过型式试验后,表明该产品分断性能已达到标准要求。但是,批量生产后如何保证每台产品可靠分断标准规定的电流是个难以确定的问题。要确保低压电器分断可靠,首先要研究该

产品分断过程中电弧能否快速进入灭弧室,是否存在似进非进即电弧进入灭弧室后又退出灭弧室的情况。通过现代测试技术可以获得电弧进入灭弧室的全过程,如发现上述现象必须改进触头灭弧系统设计,直至电弧能快速可靠进入灭弧室。另外,低压断路器分断失败往往产生于分断过程中相间飞弧与相对地短路。断路器灭弧室设计应确保分断过程中每相电弧(包括游离气体)有效隔离(包括对地),这一方法是提高断路器分断可靠性的有效途径。我国DW45断路器,在这方面取得了很好的效果。

4.2.6.3 低压电器承受环境变化可靠性

这类可靠性包括两方面内容:一是气候环境,二是电磁环境。

气候环境包括温度与湿度的变化。影响比较大的是电子式(或包含电子部件)产品。目前,漏电电器标准有这方面考核要求,其他产品尚无明确的考核办法。提高电子产品环境承受能力,必须对电子元件进行严格地筛选,并进行必要的老化试验。

电磁环境就是EMC要求,它包括两方面的内容:一方面要求低压电器在使用场合工作时,不因外界电磁干扰而引起误动作;另一方面低压电器工作时,包括闭合、分断过程产生的电磁场不干扰附近的电子设备。目前大部分低压电器产品已规定EMC要求及考核办法。随着电子技术在低压电器应用不断扩大,特别是智能化、网络化电器不断涌现,不仅是低压电器本身的可靠性,还涉及网络通信可靠性。这方面国外已有成熟技术,尚需深入研究。

总之,低压电器可靠性是一门专业学科,涉及的技术内容很多,影响因素十分复杂。本卷第4篇专门介绍低压电器与成套设备可靠性技术。

4.3 我国低压电器产品发展动向

4.3.1 我国低压电器产品结构变化动向

随着低压电器相关新技术不断发展,低压电器新产品不断投放市场。我国低压电器三代同堂的格局将发生很大变化。

第一代低压电器由于性能落后、功能单一、体积大、耗材、耗能等原因,特别是近年来低压电器材料不断涨价的因素,预计五年左右将全面淘汰。

第二代低压电器将逐步成为低档产品,主要用于备品、备件,中、小企业技术改造以及用电相对分散的农村、乡镇电网改造。

第三代产品市场占有率将进一步扩大。这代产品主要用于大、中城市电网改造,大、中型企业改造与建设以及国家、地方重点建设项目。另外,国外低压电器主要制造商施耐德、ABB、西门子、默勒、GE、Cutler Hammer、三菱、富士等公司从20世纪末到21世纪初相继推出了新一代产品。这批产品无论从产品综合技术经济指标、产品结构、材料选用(特别是环保材料的应用)及新技术的应用(如数字化与通信技术)等方面都有新的突破。这些产品将逐步进入中国市场。为了跟踪国外新产品发展动向以及满足国内市场不同层次需求,有必要发展我国第四代低压电器。

4.3.2 第四代低压电器基本要求与主要技术特征

(1) 第四代低压电器应能与国际上多种开放式先进现场总线连接,以满足低压配电与控制系统网络化需求。根据不同产品可直接与总线系统连接,也可以通过通信适配器连接。当采用不同通信适配器与不同总线系统连接时,低压电器与通信适配器之间的通信规约应采用统一的标准,以方便

低压电器生产厂生产和用户选用,否则我国可通信电器将难以推广。

(2) 第四代低压电器产品综合性能应达到国外最新一代产品先进水平。主要目标如下:

1) 高性能。根据低压配电与控制系统发展需求,对不同产品主要技术指标确定重点突破的目标,这些指标较第三代产品有显著提高。如低压断路器重点突破 I_{cs} 和 I_{cw} 。其他指标应与国外最新一代产品相当。

2) 功能扩展与提高。随着微处理器和通信技术在新一代低压电器中普遍应用,低压电器功能必须得到进一步扩展与提高。如电网质量监控、能量管理以及选择性保护功能进一步完善等。而这些功能对提高低压配电系统运行质量和可靠性具有重要意义。

3) 高可靠。提高可靠性是第四代产品主要目标之一,要从产品设计、材料选用、制造工艺、产品检测等方面综合考虑,有条件的产品要制定内部可靠性考核指标和考核办法。

4) 提高产品维护性能、方便用户使用是国外新一代产品追求目标之一,我国第四代低压电器以及今后新产品发展必须对此引起充分关注。

(3) 第四代低压电器产品结构必须有重大创新:

1) 产品总体方案、结构布局、主要部件结构应有新的突破。

2) 产品模块化程度较第三代产品有明显提高。

3) 附件、配套件、连接方式齐全,以满足不同用户需要。

4) 新一代低压电器外形应有明显改观。

(4) 第四代低压电器主要材料的选用应满足环保要求并符合欧盟指令中明确“在电气设备中限制使用含有铅、汞、镉、六价铬、多溴二苯醚和多溴联苯等六种有害物质的材料”的要求,使我国低压电器逐步向环保电器发展。

(5) 第四代低压电器零部件结构及产品总装、检测应适应自动化生产要求。目前我国低压电器生产规模和制造水平已初步具备采用自动装配与自动检测要求。为此,在新一代产品设计阶段就要考虑这方面工艺要求,为我国低压电器整体水平的提高奠定基础。

(6) 新一代产品安装与出线方式应考虑母排连接与安装一体化结构形式。使第四代产品组成配电网络更灵活,为用户配电方案变化提供方便。同时能更好地有效利用开关柜空间,为低压成套开关设备小型化创造条件。

4.3.3 我国低压电器产品总体发展趋向

4.3.3.1 智能化、可通信

进一步完善低压配电与控制智能网络系统,扩展智能网

络配套电器产品;配合低压成套电器行业开展智能化、可通信低压成套开关与控制设备的研制与推广。尽快形成一批具有智能配电与控制网络系统集成能力的低压电器和低压成套设备生产企业;用现场总线实现中、低压配电系统联网,实现中、低压配电系统短路保护区域联锁,扩大配电系统选择性保护范围。大幅度提高配电系统可靠性,进而实现配电保护自动化。

4.3.3.2 加速我国第四代低压电器研发与推广

上海电器科学研究所(集团)有限公司已联合国内优秀企业启动第四代低压电器第一批四个系列产品研发工作,为我国低压电器发展翻开了新的一页。第四代产品研发重点放在国外近年来发展最迅速的几大类低压电器上。

(1) 配电电器:重点发展新一代高性能、小型化、智能化、可通信、万能式断路器和塑壳断路器两大系列产品。

(2) 控制电器:重点发展电动机保护与控制类电器,包括电动机保护塑壳断路器、交流接触器、过载继电器(热双金属片式、电子式)、控制与保护开关电器。前三类电器开发时要从系统角度考虑,同电流等级产品宽度与相间距离应保持一致。以便于拼装各类组合电器。

(3) 终端电器:重点发展带短路延时分断功能小型断路器,以实现终端配电回路选择性保护。同时发展带电动操作的小型断路器,为终端配电系统实现网络化创造条件。断路器要进一步实现小型化,并考虑母排安装与接线一体化结构。

4.3.3.3 继续发展并大力探索各类新型电器

包括电子电器(如电子式电动机保护器、软起动器、电子电力开关等)、真空电器(低压真空断路器、真空接触器)、低压电涌保护器及低压防雷箱、电弧故障保护开关等。

4.3.3.4 对第三代产品进行二次开发

根据市场需求对部分第三代产品进行二次开发,以进一步提高性能和性价比。目前相当一部分优秀企业都在对第三代万能式断路器、塑壳断路器进行二次开发,以增强市场竞争力。

4.3.3.5 发展新一代经济型产品

国外许多大公司在发展新一代产品时往往同时考虑两个发展方向:一方面向高性能发展,另一方面向经济型发展,以满足不同市场层次的需要。我国第一代、第二代产品虽然价格便宜,但是由于体积大、耗材、功能单一等原因不能满足要求。所以,我国新一代经济型低压电器应在第三代低压电器上派生或在第四代产品开发时同时发展经济型产品。

第 2 章 低压电器基本理论

1 电弧理论

1.1 电弧的物理基础

自从电流开始流动的那一时刻起，人们就知道需要有一种装置可以使得电流的流动开始或终止。从根本上说，有两种方法可以使电流的流动终止：一种方法是使电路的源电压为零；另一种是使一对触头分开，在导流导体的某一部分形成一个断开间隙。从历史发展来看，第二种方法成为电路开断的最主要方法。

最早用于电路开断的是水银开关，它将一对导体棒浸入到装满水银的槽中。后来，随着电流开断技术的发展，水银开关被闸刀开关所取代，闸刀开关至今还广泛应用在低压小功率的场合。现在，在最先进的电流开断技术中，电流开断仍然是从一对触头的分开开始的，触头间隙中形成的等离子体连接在两个电极之间。当采用某种技术使得等离子体的电导率大大降低后，其导电性能丧失，从而完成从电的良导体到电的绝缘体的转换，开断完成。

开关中的等离子体称为电弧等离子体，简称“电弧”。电弧是电流开断过程中的一个基本的、不可缺少的，又极为活跃的要素。电弧电导率变化的过程是电流开断的基础。因此对电弧理论的认识和掌握有助于理解电流开断过程。

等离子体是由大量带电粒子组成的非束缚态宏观体系。其特征是正电荷和负电荷在时间和空间上的平均密度都近似相等。电荷密度相等，即准电中性是等离子体非常重要的性质。在开关中，等离子体就是在触头间“燃烧”的电离气体，即电弧。

1.2 电弧的产生

1.2.1 触头间隙中气体的击穿

随着触头间隙施加的电压增加，触头间隙的电场强度随之增加，当电场强度超过间隙气体（或金属蒸气）电离电位（见表 2.2-1）时，间隙击穿形成电弧。

表 2.2-1 电 离 电 位 值			
气 体	电离电位 (V)	气 体	电离电位 (V)
Air	14	Cd	9.0
A	15.7	O	13.5
CO ₂	14.4	Cu	7.7
H	13.5	Ag	7.5
W, Pd	8.2	Al	5.9
N	14.5		

1.2.2 触头闭合时电弧的产生

当触头闭合时，随着间隙逐渐缩小，触头间隙的电场强度不断增加，当电场强度超过间隙电离电位时，间隙击穿形成电弧。

1.2.3 触头打开时电弧的形成

当触头分离时，在电流和电压超过一最小值时，在触头

间隙中产生电弧。其过程是：在触头开始分离时，作用在它们之间的接触压力不断减小，接触面积也缩小，因而接触电阻和触头中放出的热量增加。热量集中在很小的体积中，金属被加热到高温而熔化，在触头之间形成液态金属桥。图 2.2-1 示出触头打开拉长熔融金属桥时的电压变化，当金属桥拉长时它开始变得不稳定，这种不稳定来自于液态金属桥的表面张力，高温部位的气化，金属桥根部与高温区域温度差造成的对流等。最后金属桥被拉开，向触头间隙释放金属蒸气。此时阴极区域的温度已达到充分发射电子的程度，释放到触头间隙中的炽热金属蒸气创造了热电离的条件。在触头间隙中不仅电子与离子的碰撞会产生电离，而且原子与原子的碰撞，甚至辐射也会产生电离，因此在熔融金属桥断裂后，当触头上施加的电压高于最小起弧电压时，电弧将会迅速形成。触头打开时形成电弧的过程如图 2.2-2 所示。

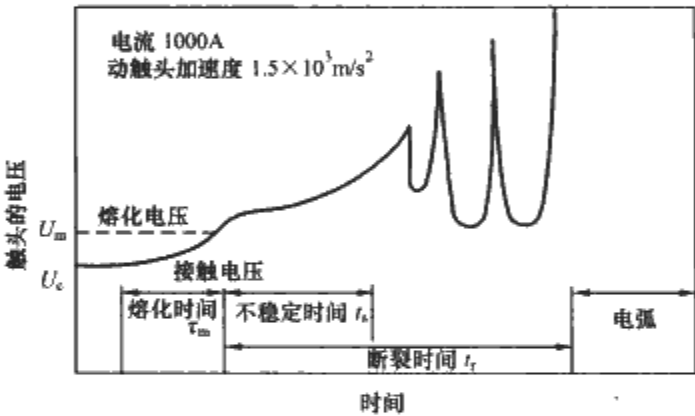


图 2.2-1 一个正在打开触头上的电压降

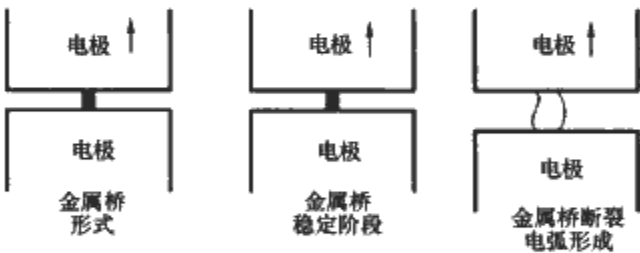


图 2.2-2 触头打开过程—形成熔融金属桥，金属桥断裂后形成电弧

2 电接触理论

电接触的基本任务是传导电流，了解电接触知识是为了使接触元件在接触时良好地导电。

2.1 收缩电阻

所有的固体表面从微观上看都是凹凸不平的，表面微观突起和凹陷的形状、高度变化、平均距离以及其他几何特征都取决于表面加工的过程。两个触头实际接触的物理图如图 2.2-3 所示。当两个表面实际接触时，即使外加很大的接触压力，也只有少数的点实际发生了接触，即实际接触面积只是名义接触面的很小一部分。金属表面一般都覆盖着不导电的氧化膜或其他种类的绝缘膜，只有少部分膜破裂的地方才能形成金属与金属之间的直接接触导通电流，由此可知两个导体真正能够接触导通电流的面积要比名义接触面积小

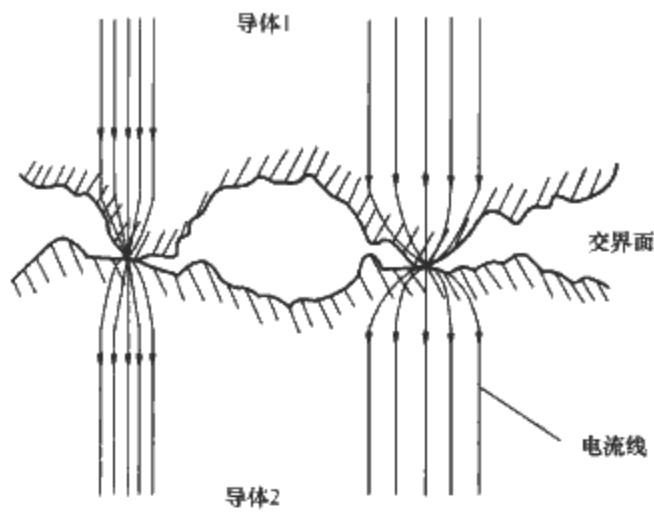


图 2.2-3 两个触头接触情况示意图

得多。

为了区别在实际接触的小面积上有导电和不导电的部分，把发生实际接触的小面积称为“机械接触斑点”，简称“接触斑点”。其中形成金属接触或准金属接触的面积，即实际传导电流面积称为“导电斑点”，国际上通用的术语叫做“a 斑点”。

由图 2.2-3 可以看出，电流线在导电斑点处发生弯曲变形，直至所有的电流线都交汇到导电斑点（或 a 斑点）处。由于电流线在导电斑点附近发生收缩，使电流流过的路径增加，导体的有效导电截面积减小，因而出现局部的附加电阻，称为收缩电阻。一般来说在接触面上还经常有电阻率很大的由污染物形成的膜，这又进一步增加了电阻，称作膜电阻。收缩电阻和膜电阻之和称为接触电阻，它是两个接触导体形成的交界面的总电阻。

2.1.1 圆形 a 斑点

为了简单起见，在收缩电阻的分析过程中一般都假定 a 斑点是圆形的。大多数的电接触问题都可以用圆形 a 斑点描述。

两个半径无限大导体之间的一个半径为 a 的圆形导电斑点如图 2.2-4 所示，两个导体中的等位面为一椭球面，在纵

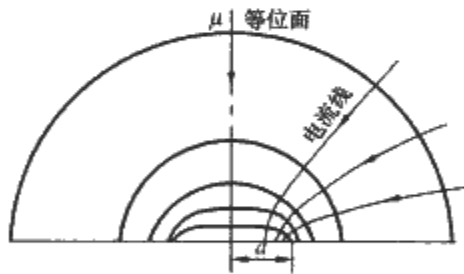


图 2.2-4 圆形导电斑点附近等位面和电流线分布（只绘出一半）

轴上高度为 μ 的等位面之间所包含部分的电阻由下式给出

$$R_{\mu} = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^{\mu} \frac{1}{a^2 + \mu'^2} d\mu' = \frac{\rho}{2\pi a} \arctan \frac{\mu}{a} \quad (2.2-1)$$

式中：ρ 为导体的电阻率。当 μ 很大，即距离收缩处足够远时，可得一个接触导体的收缩电阻或分布电阻为

$$R_s = \frac{\rho}{4a} \quad (2.2-2)$$

两个导体的总收缩电阻是其两倍

$$R_c = \frac{\rho}{2a} \quad (2.2-3)$$

收缩电阻表达式 (2.2-2) 和式 (2.2-3) 广泛地见于各种电接触相关的文献以及电接触相关的设计中。如果两个接触导体的电阻率不同，分别为 ρ₁ 和 ρ₂，那么每一侧的收缩

电阻为 ρ_i/(4a), i = 1, 2。那么总收缩电阻为

$$R_c = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4a} \quad (2.2-4)$$

用铜导体之间的电接触为例来估计一下 a 斑点的半径对收缩电阻的影响，导电斑点为圆形 a 斑点，铜的电阻率为 ρ = 1.75 × 10⁻⁸ Ω · m，结果示于表 2.2-2 中。

表 2.2-2 铜导体与铜导体接触的收缩电阻
(圆形 a 斑点)

a 斑点半径 (μm)	收缩电阻 (Ω)
0.01	0.88
0.1	8.8 × 10 ⁻²
1	8.8 × 10 ⁻³
10	8.8 × 10 ⁻⁴

从表 2.2-2 中可以看出，当收缩半径为 10 μm 时收缩电阻约为 1 mΩ，这是一个非常低的电阻值。事实上，当 20 A 电流通过这个收缩点时都不会引起过热。如果收缩半径达到 100 μm 时通过 200 A 的电流也不会引起过热。由此可以看出，当两个导体相互接触导电时并不需要两个接触面之间有很大的导电面积就可以得到满意的低接触电阻。

如图 2.2-5 所示的两个半径为 R 的圆柱形导体相接触且接触面为圆形 a 斑点的情况，其收缩电阻 R_c 的确表达式为

$$R_c = \frac{\rho}{2a} [1 - 1.41581(a/R) + 0.06322(a/R)^2 + 0.15261(a/R)^3 + 0.19998(a/R)^4] \quad (2.2-5)$$

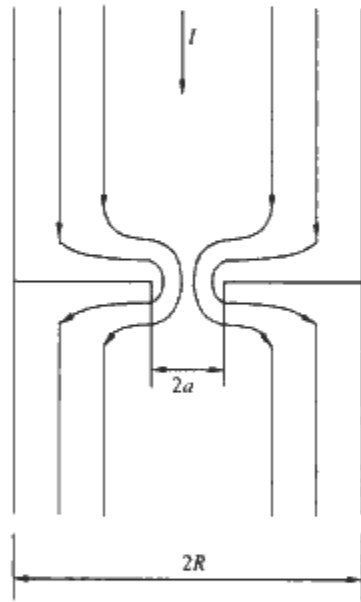


图 2.2-5 两个半径为 R 的圆柱形导体相接触且接触面为圆形 a 斑点

当收缩半径 a 比导体半径 R 小得多时，式 (2.2-5) 可简化为式 (2.2-3)。图 2.2-6 示出半径为 R 的圆柱形导体相接触且接触面为半径为 a 的圆形时，在不同的 a/R 下，收缩电阻 R_c 测量值和式 (2.2-5) 计算值的比较，测量值与计算值相符很好。

2.1.2 多斑点接触

实际上电流从一个导体传导到另一个导体时不止经过一个 a 斑点，而是要经过多个 a 斑点。a 斑点是由两个接触面上微观的凸凹不平形成的，这在图 2.2-3 中清楚地表明。接触斑点的数量随接触压力的增加而增多。事实上两个名义平面之间的电接触是通过 a 斑点阵列来完成的。接触电阻不仅受 a 斑点数量和尺寸的影响，还受 a 斑点阵列的分布和尺寸的影响。虽然两个导体之间在很多接触斑点处有接触，但是只有在表面绝缘膜如氧化膜破裂或剥离时接触斑点才成为导

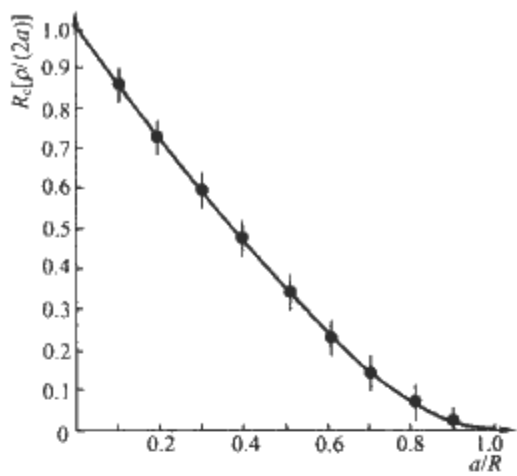


图 2.2-6 收缩电阻 R_c 测量值和计算值的比较

电的 a 斑点。很难预测有多少斑点是导电的 a 斑点，但是它们比机械接触斑点的数量少得多。

为了方便进行计算，采用圆形 a 斑点来分析导体之间的多个 a 斑点接触问题。在最简单的情况下， n 个圆形 a 斑点都处于一个 a 斑点阵列中，格林伍德 (Greenwood) 的计算表明，式 (2.2-6) 能给出这种情况下收缩电阻的一个很好的近似值

$$R_c = \rho \left(\frac{1}{2n\alpha} + \frac{1}{2a} \right) \tag{2.2-6}$$

表 2.2-3 a 斑点半径对收缩电阻 $1/(2n\alpha)$ 和霍尔姆半径 α 的影响

a 斑点半径	a 斑点电阻 $1/(2n\alpha)$	霍尔姆半径 α	霍尔姆电阻 $1/(2\alpha)$	具有同样收缩电阻的单个导电斑点半径
0.02	0.328 9	5.34	0.093 7	1.18
0.04	0.164 5	5.36	0.093 2	1.94
0.1	0.065 8	5.42	0.092 3	3.16
0.2	0.032 9	5.50	0.090 9	4.04
0.5	0.013 2	5.68	0.088 0	4.94

注 表中数值是在斑点之间距离取 1、a 斑点的最大半径取 0.5 情况下得到的。

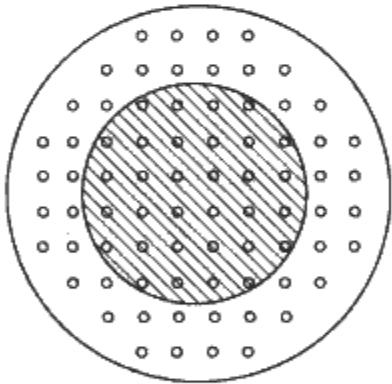


图 2.2-7 a 斑点阵列图

Greenwood 和 Williamson 证明了在大多数实际情况下实际接触点的变形都是塑性变形。Bowden 和 Tabor 提出接触压力是由相接触的两种材料中较软的一种材料上的微突起的塑性流动来承担的。按照这种假设，机械接触面积 A_c 与施加在接触面上的负荷以及较软的材料硬度 H 之间存在如下关系

$$F = A_c H \tag{2.2-7}$$

式 (2.2-7) 可以有效地解释接触电阻测量结果。它表示两个表面之间真正的机械接触面积与名义接触面积无关，即 $A_c = F/H$ ，而只与接触压力和接触材料的硬度有关，并且与接触导体的尺寸也无关。

如果接触面上没有绝缘膜，并且在霍尔姆半径 α 内分布着足够多的 a 斑点，那么可以从表 2.2-3 可推断收缩电阻 R_c 约为

式中： a 为导电斑点的平均半径，定义为 $\Sigma a_i/n$ (a_i 为第 i 个斑点的半径)； α 为斑点阵列的半径，又叫做霍尔姆半径 (Holm radius)。

格林伍德采用图 2.2-7 所示的 76 个相同的 a 斑点形成的阵列，阴影区域是与其电阻相等时单个斑点的面积，外面的圆轮廓线半径是斑点阵列的霍尔姆半径。给出了当 a 斑点半径增加时式 (2.2-6) 中的二项大小的比较，如表 2.2-3 所示。由表 2.2-3 可知， a 斑点的半径大约超过 0.05 时霍尔姆电阻 $1/(2\alpha)$ 的值即开始超过 a 斑点电阻，而具有同样收缩电阻的单个导电斑点半径与霍尔姆半径 α 相近。在许多情况下，接触面上没有绝缘膜，接触点均匀地分布在整个视在接触面积中，在这种情况下 a 斑点的数量和分布对于接触电阻的影响并不大。这个结论又被 Nakamura 和 Minowa 等研究者进一步证实，他们用有限元法和蒙特卡洛法来分析 a 斑点的分布对收缩电阻的影响。他们发现当电接触的面积一定时， a 斑点在整个名义接触面积中的位置对收缩电阻没有影响。仅当 a 斑点分布在视在接触面的边缘部位时才对收缩电阻有较大影响，即使是在这种情况下的收缩电阻也只是正常分布情况的 2 倍。从上述结果可知，在工程上知道霍尔姆半径就足以估计接触电阻了。作为一个初步近似，可以采用实际电接触面积 A 估算霍尔姆半径为 $(A/\pi)^{1/2}$ 。

$$R_c = \rho/(2\alpha) \tag{2.2-8}$$

以及

$$A_c = \eta \pi \alpha^2 \tag{2.2-9}$$

式中： η 为经验系数，对于清洁的接触面其经验值为 1。

由式 (2.2-7)、式 (2.2-8) 和式 (2.2-9) 可得收缩电阻为

$$R_c = \sqrt{\frac{\rho^2 \eta \pi H}{4F}} \tag{2.2-10}$$

式 (2.2-10) 在较大的机械负荷范围内具有广泛的有效性，对于多种触头材料它的结果与发表的实验结果相一致，说明微突起的塑性变形过程并不重要，同时也说明式 (2.2-10) 推导过程的假设并没有过于简化。式 (2.2-10) 现在广泛地被设计工程师所接受，在材料硬度和接触负荷已知的条件下来估计收缩电阻的值，得到的结果与实际测量值误差在 20% 以内。如果接触面上有电阻性的膜存在，那么在式 (2.2-10) 的右端要增加一项来考虑膜电阻的影响。

2.2 表面膜对收缩电阻和接触电阻的影响

如果在接触面上有一层膜存在，那么它会对接触电阻产生影响。如果是一层导电膜， a 斑点的收缩电阻相对于没有膜时有可能减小或者增加，这取决于膜的电阻率相对于基体材料电阻率的大小。膜的硬度也会对接触电阻产生影响，这一点也可以从式 (2.2-10) 得到。如果膜是带有一定电阻的金属化合物，接触电阻通常会增加。如果是绝缘膜或弱导电膜，要得到良好的电接触则必须用机械的方法使膜破裂，形

成金属与金属之间的接触。

2.2.1 导电膜

电镀层常用于减小接触电阻。其原理是采用电镀层降低表面硬度，使电镀层电导率比基体高得多，以及防止绝缘膜的出现等。电镀层还可用于保护接触面不被锈蚀，防止机械磨损等。本节的目的了解电镀层的接触电阻特性。

电镀层对接触电阻的影响与镀层的电导率相对于基体材料电导率的大小有关，还与 a 斑点半径与电镀层厚度的比值有关。

当电镀层材料的电导率比基体材料电导率低而且 a 斑点半径与电镀层厚度在同一数量级时，电流在电镀层中比在基体中分布更紧凑一些，如图 2.2-8 (a) 所示。在这种情况下，电镀层中的电流几乎均匀地穿过 a 斑点。此时收缩电阻近似为

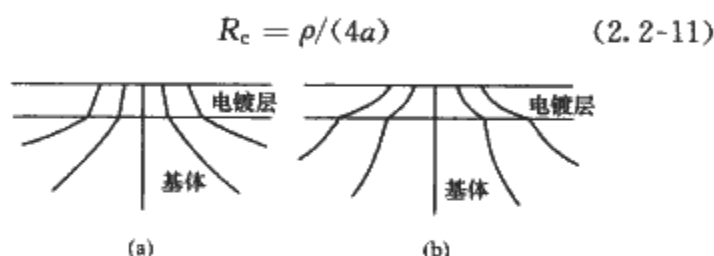


图 2.2-8 电流在金属基体及表面镀层中的分布

(a) 镀层电导率比基体材料电导率低，电流线在电镀层中的分布比基体中更紧凑；(b) 镀层电导率比基体材料电导率高，电流线在电镀层中的分布比基体中更分散

式中： ρ 为基体材料的电阻率。因为电流还通过面积为 πa^2 的膜，其厚度为 d ，电阻率为 ρ_f ，所以膜电阻近似为 $\rho_f d / (\pi a^2)$ 。在膜足够薄时，作为一个初步近似总电阻 R_t 为

$$R_t = R_c + \rho_f d / (\pi a^2) \quad (2.2-12a)$$

或

$$R_t = [\rho / (4a)] [1 + (4/\pi)(\rho_f/\rho)(d/a)] \quad (2.2-12b)$$

当 a 斑点半径和电镀层厚度变化不大时，总电阻随电镀层厚度的增加几乎线性增加。当膜的厚度达到一定程度时，总电阻会偏离上述表达式而接近 $\rho_f / (4a)$ 。由式 (2.2-12b) 可知当 $(\rho_f/\rho)(d/a)$ 远远大于 1 时，接触电阻中膜电阻所占的比重就会大大超过收缩电阻，这个结论被 Nakamura 和 Minowa 的计算机仿真所证实。

当电镀层的电导率比基体材料电导率高时，电流线在电镀层中的分布比在基体中更分散，如图 2.2-8 (b) 所示。此时收缩电阻随镀层厚度的增加而减小。当膜的厚度比 a 斑点的尺寸大得多时，接触电阻还会趋向于 $\rho_f / (4a)$ 。

如果两种材料相接触，一种电阻率为 ρ ，在它上面镀膜后等效电阻率为 ρP_f ，另一种材料的电阻率为 ρ_p ，那么由式 (2.2-10) 可得接触电阻为

$$R_t = \left(\frac{\rho_p + \rho P_f}{2} \right) \sqrt{\frac{\pi H}{4F}} \quad (2.2-13)$$

式中： H 为较软金属的硬度； P_f 为镀层系数，是负荷 F 的函数。

图 2.2-9 和图 2.2-10 为镀层系数与比值 $d/(2a)$ (电镀层厚度与 a 斑点直径之比) 的关系，图 2.2-9 为电镀层电导率比基体材料电导率低的情况，图 2.2-10 为电镀层电导率比基体材料电导率高的情况。

下面来举例说明。例如用一个金探针与表面镀锡的铜接触，温度为室温，接触压力为 1N。纯金的硬度为 300 N/mm²，它比锡的硬度 40N/mm² 大得多，因此式 (2.2-

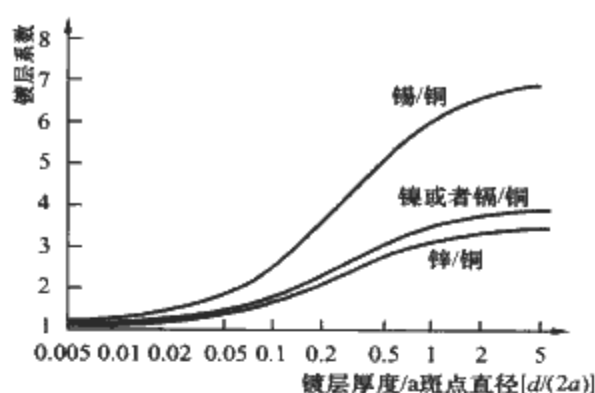


图 2.2-9 镀层电导率比基体材料电导率低时镀层系数与比值 $d/(2a)$ ，即镀层厚度与 a 斑点直径之比的关系

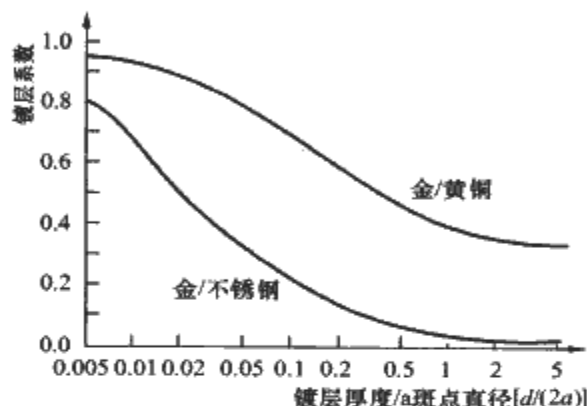


图 2.2-10 镀层电导率比基体材料电导率高时镀层系数与比值 $d/(2a)$ ，即镀层厚度与 a 斑点直径之比的关系

13) 中的硬度 H 值取 40N/mm²。从式 (2.2-7) 可知接触面积为 F/H ，即 $(0.1/4)$ mm² = 0.025mm²，假设以圆形 a 斑点接触，则平均斑点半径为 $(\sqrt{0.025/\pi})$ mm = 0.089mm = 89μm。镀层厚度与斑点平均直径的比值为 10/178 = 0.06，由图 2.2-9 可以得到镀层系数 P_f 等于 2。纯金的电阻率为 $\rho_p = 2.3 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{mm}$ ，铜的电阻率为 $\rho = 1.75 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{mm}$ ，由式 (2.2-13) 可得接触电阻为

$$R_t = \left[\left(\frac{2.3 \times 10^{-5} + 1.75 \times 10^{-5} \times 2}{2} \right) \times \sqrt{\frac{\pi \times 4}{4 \times 0.1}} \right] \Omega = 1.63 \times 10^{-4} \Omega$$

如果考虑可导电的薄污膜对接触电阻的影响，因为污染物的电阻率 ρ_{cont} 通常比金属的电阻率大得多，它对接触电阻的影响可用推导式 (2.2-11) 的方法得到，得到膜电阻为 $\rho_{\text{cont}} d_{\text{cont}} / (\pi a^2)$ ，式中 d_{cont} 为薄污膜的厚度。因为接触面积为 F/H ，即 $\pi a^2 = F/H$ ，所以总接触电阻为

$$R_c = \left(\frac{\rho_p + \rho P_f}{2} \right) \sqrt{\frac{\pi H}{4F}} + \frac{\rho_{\text{cont}} d_{\text{cont}} H}{F} \quad (2.2-14)$$

式 (2.2-14) 用于解释带有可导电的污物膜接触电阻测量数据，在工程实践中得到了广泛应用。通常采用在被测表面上施加一个金属探针的方法，测量到的电阻是所施加力的函数。探针材料通常用纯金，探针末端做成一个圆滑的半球形状。如果测量到的电阻与负荷的关系呈 F^{-1} 的趋势，那么由式 (2.2-14) 可知金属表面上有一层可导电的薄污膜。

2.2.2 绝缘膜

有些金属表面由于生成氧化物或被腐蚀而形成不导电的绝缘膜，如铝表面的 Al_2O_3 膜， Al_2O_3 膜是一个很好的绝缘体，因此用 Al 作接触元件时，只有设法将接触表面上的 Al_2O_3 膜破坏掉才能实现导电。在这种条件下， a 斑点的形状以及收缩电阻与绝缘膜断裂的模式以及裂缝的形状有关。

对两个接触面为半球形的铝导体在空气中加载不同载荷测量了接触电阻，测量结果示于图 2.2-11 (a) 中，在载荷约为 1N 时氧化膜发生断裂。图 2.2-11 (b) 示出了同一接

触面在超高真空中氧化膜被离子束刻蚀方法去掉后的接触电阻特性，与图 2.2-11 (a) 的情况不同，在无氧化膜的情况下不仅触头接触时立即形成电接触，而且形成了洁净金属表面的冷焊，表现为在去掉载荷时有一个显著的附着力。图 2.2-11 中两种情况清楚地说明氧化膜和其他绝缘膜对形成可靠地电接触的妨碍作用。

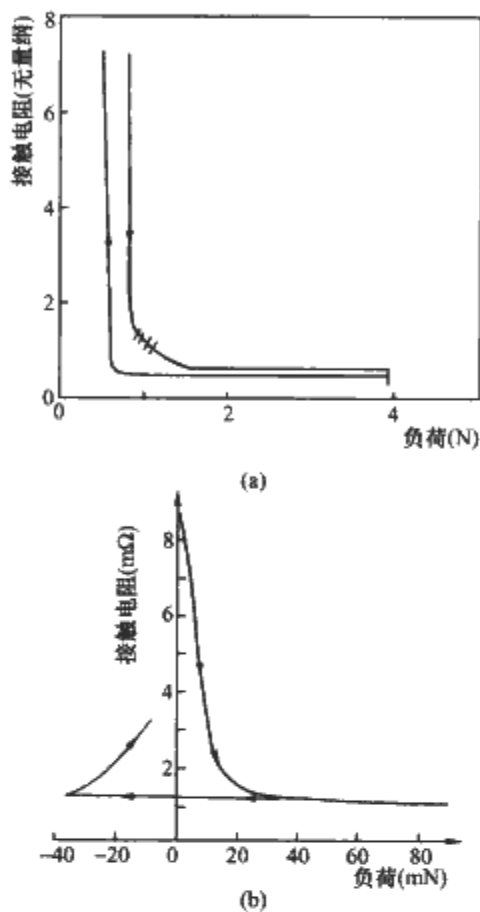


图 2.2-11 铝导体与铝导体之间的接触电阻
(a) 接触面上有氧化膜；(b) 氧化膜已被去掉

图 2.2-12 示出在氧化层包围下的一个接触斑点。如果 a 斑点的半径比氧化膜的尺寸小，那么膜电阻为

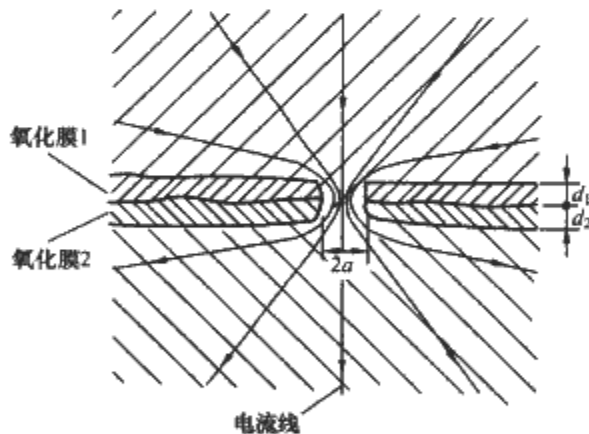


图 2.2-12 氧化膜包围下的 a 斑点

$$R_f = \frac{\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2}{A} \tag{2.2-15}$$

式中： ρ_1 、 ρ_2 和 d_1 、 d_2 分别为两接触面上的膜电阻率和氧化膜平均厚度； A 为接触面积。

Ag 在常温空气中不易氧化，只与臭氧作用生成 Ag_2O 。 Ag_2O 较软，用机械方法易于去除，这种氧化物在 200°C 时即分解，不妨害触头工作。但是如果在大气中有硫化物，在 Ag 表面会生成一层 Ag_2S 膜，它的电阻率很高，在 $10^5 \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ 之间。 Ag_2S 能在大气中缓慢生长，即使空气中硫或硫化物如 SO_2 ，以及 H_2S 与 H_2O 的混合物的含量只有十亿分之几，已足以对银接触面产生损害。因此大气污染会对 Ag 触头的工作造成很大威胁。

2.3 a 斑点的稳态热效应

导体与导体接触处由于有接触电阻的存在，当电流通过它时必然产生焦耳热，使接触点局部区域温度升高。温度升高会促进表面膜的生长，使接触电阻增大，严重时接触点的温度可达到材料的软化点甚至熔点，使接触面产生熔焊。对于开关领域，了解电接触的热效应的目的在于减小触头的发热和温升，以及避免触头闭合时熔焊的发生。

研究电接触热效应应得到导电斑点及其附近的温度及其分布。由于导电斑点在两个接触面之间，而且尺寸很小，用一般的方法不能直接测得导电斑点的附近区域的温度。如果找到导电斑点温度与易于测量的接触电压之间的关系，利用测出的接触电压值即可间接得知导电斑点温度。

处理热平衡下的同种金属电接触问题时，通常假定导体的外表面与外部环境是绝热的，a 斑点中产生的热仅仅在导体内传播。在这样的条件下，电流线和热流线重合，等位面 and 等热面重合。在一定温度范围内，存在如下电压—温度关系

$$T_m - T_1 = \frac{U^2}{8\lambda\rho} \tag{2.2-16}$$

式中： T_m 为导电斑点温度； T_1 为收缩区外导体温度； U 为接触电压降； λ 为接触材料的热导率； ρ 为接触材料的电阻率。

式 (2.2-16) 的左端项 ($T_m - T_1$) 是 a 斑点温度与收缩区外导体温度之差，叫做接触超温。式 (2.2-16) 右端项的材料参数只包括 λ 和 ρ ，而与触头几何形状无关，因此适用于任何形状和任意尺寸的触头。式 (2.2-16) 广泛见于各种电接触文献中，并被称为 $\phi-\theta$ 理论 (ϕ 表示电压， θ 表示温度)，在工程中用来评估电接触的超温。

$\phi-\theta$ 理论表明对于绝大多数金属来说，导电斑点温度与接触电压之间有一确定的关系，通过这个关系可以把难于测量的导电斑点温度转化为易于测量的接触电压，由电压而知其温度。图 2.2-13 为适用于大多数接触材料的接触电压—导电斑点温度关系曲线，一般电接触在极限工作状态下的超温不超过 $1 \sim 3^\circ\text{C}$ 。

在超温达到几十摄氏度时，式 (2.2-16) 已无法使用，因为它是在材料的电阻率和热导率都是常数的基础上推出的。在更高接触温度下，热导率和电阻率在一个很宽的温度范围内随温度的变化关系可表达为 $\lambda = \lambda_0(1 - \beta T)$ ， $\rho = \rho_0(1 + \alpha T)$ ，其中下标 0 指的是在 0°C 的值， β 和 α 分别是热导率和电阻率的温度系数。金属的热导率一般随温度的增加而减小，而电阻率增加。由此得到如下关系

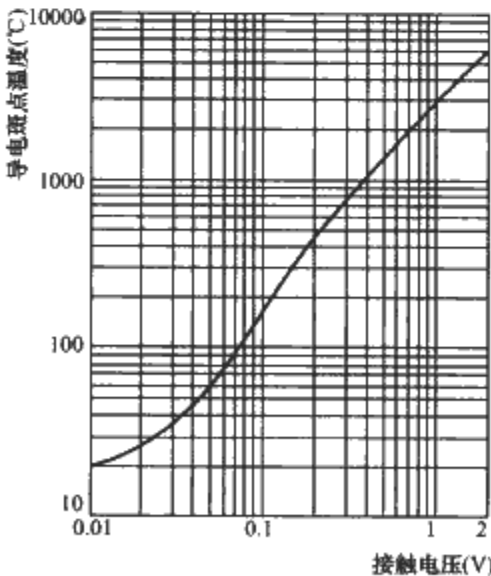


图 2.2-13 适用于大多数接触材料的接触电压—导电斑点温度关系曲线

$$U^2 = 8\lambda_0\rho_0[(T_m - T_1) + (\alpha - \beta)(T_m^2 - T_1^2)/2 - \alpha\beta(T_m^3 - T_1^3)/3]$$
 (2.2-17)

在一个较宽的温度范围内（材料的电阻率和热导率与温度满足线性关系）式（2.2-17）成立。

魏德曼弗朗兹定律指出，金属的热导率和电阻率随温度的变化满足如下关系

$$\lambda\rho = LT$$
 (2.2-18)

式中：L 为洛伦兹常数， $L=2.45\times10^{-8}V^2/K^2$ ；T 为热力学温度。

只要金属的热导率和电阻率是由电子传输过程所决定，式（2.2-18）即成立。因此在常见的电接触温度范围内，这个关系都能够很好地描述金属的热传输特性和电传输特性。如果式（2.2-18）成立，可以导出

$$U^2 = 4L(T_m^2 - T_1^2)$$
 (2.2-19)

式（2.2-19）与接触材料的热导率和电阻率无关，无论是同种金属接触或不同金属接触都能适用。

式（2.2-19）虽然准确，但是使用起来不如式（2.2-16）方便，因为它无法直接由接触电压降得到超温。以铜—铜接触为例，在不同的接触压降U下由式（2.2-16）得到的超温和由式（2.2-19）得到的更准确的超温比较结果示于表2.2-4中，收缩区外导体温度T₁为20℃，室温下铜的电阻率和热导率分别为1.75×10⁻⁸Ω·m和380W/(m·℃)。由表2.2-4可以看出，在接触电压降不超过0.05V时从工程的角度看它们的差别很小，从而人们更常用式（2.2-16）来估计电接触中的超温。

表 2.2-4 式（2.2-16）和式（2.2-19）得到的超温结果比较

接触电压降 (V)	超温式式（2.2-16） (℃)	超温式式（2.2-19） (℃)
0.005	0.47	0.44
0.01	1.9	1.7
0.02	7.5	6.9
0.03	17	15
0.04	30	27
0.05	47	41

3 电器发热

3.1 允许温度

电器设备在工作中都会发热。电器发热造成的主要问题在于，零部件的温度过高可能使材料的物理、化学性能起变化，机械性能和电气性能下降，最后导致电器的工作故障，甚至造成严重事故。

为了保证电器在工作年限内可靠工作，必须限制各种材料的发热温度，使其不超过一定数值，这个温度就是最高允许发热温度，简称最高允许温度。极限允许温度与工作环境温度之差为极限允许温升。周围环境的温度高低直接影响到电器的散热情况。我国标准规定周围空气的温度范围为（-40~40）℃。

制定电器各部分的极限允许温度（极限允许温升）的依据是：保证电器的绝缘不致因温度过高而损坏，或使工作寿命过分降低；导体和结构部分不致因温度过高而降低机械性能。不同的材料及工作部位允许的工作温度是不同的。下面分别介绍金属材料、接触连接部位绝缘材料及断路器的允许

温度。

（1）金属材料的允许温度决定于材料的机械强度是否变化。温度过高，材料软化，机械强度明显下降。例如铜在不同温度下的抗拉强度如图2.2-14所示。在长期工作时，当温度大于100℃以上时，机械强度明显下降；在短时发热情况下，在300℃左右机械强度明显下降。铜在长期工作和短时工作时的允许温度就是这样决定的。

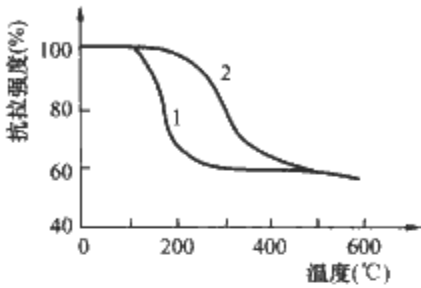


图 2.2-14 铜的抗拉强度与温度的关系
1—长期工作；2—短时工作

（2）接触连接的允许温度主要决定于接触电阻的稳定性。接触连接处温度如过高，接触表面会强烈氧化，接触电阻会大大增加。接触电阻的增加会造成附近零件温度过高，甚至可能发生熔焊。为了保持接触电阻的稳定性，电接触部位的允许温度规定得较低。

（3）有机绝缘材料的温度过高，会使材料逐步变脆老化，材料的绝缘性能也随之下降。例如A级绝缘，在一定温度范围内，每增加8~10K，材料的使用寿命缩短一半。有机绝缘材料的允许温度主要由这一因素决定。GB 11021/T—2007《电气绝缘耐热性分级》将电气绝缘材料的耐热性划分为若干等级。耐热等级表示该产品在额定负载和规定的其他条件下达到预定使用期时所能承受的最高温度。各耐热等级及其对应的温度见表2.2-5。

表 2.2-5 电气绝缘材料的耐热分级

耐热等级	Y	A	E	B	F	H	200	220	250
温度(℃)	90	105	120	130	155	180	200	220	250

（4）断路器短时通过短路电流时，允许温度可以比长期工作的允许温度高些，具体规定为：

- 1) 与Y、A、E、B级有机绝缘材料或油接触的的金属（铝除外），载流部分的最高允许温度为250℃。
- 2) 不与Y、A、E、B级有机绝缘材料或油接触的铜及铜合金的载流部分的最高允许温度为300℃。
- 3) 铝质载流部分的最高允许温度为200℃。
- 4) 固定接触的部分不超过其他载流导体的发热。
- 5) 电器主触头的温度在200℃以内，对弧触头的要求是不熔焊。

电器的发热与温升取决于产热和散热之间的平衡，下面分别对热的产生和传热方式进行介绍。

3.2 热的产生

电器中的热源主要来自三个方面：①电流通过导体产生的电阻损耗；②交流电器铁磁体内涡流磁滞效应产生的铁磁损耗；③交流电器绝缘体产生的介质损耗。由于介质损耗与电场强度和频率有关，电场强度越大，频率越高，介质损耗越大，因此在低压电器中介质损耗通常很小，可忽略不计。在此只讨论前两个方面。

3.2.1 电阻损耗

电流流经断路器导电部分时，由导体电阻发热产生电阻

损耗。电阻损耗功率 P 为

$$P = I^2 R \tag{2.2-20}$$

式中： I 为电流，A； R 为断路器导电回路电阻， Ω 。

断路器导电回路电阻由两部分组成，即

$$R = R_c + K_a R_b \tag{2.2-21}$$

式中： R_c 为导电回路中各接触部分的接触电阻， Ω ； K_a 为交流附加损耗系数； R_b 为导体电阻， Ω 。

K_a 与集肤效应有关，对圆导体， K_a 可查图 2.2-15 曲线。

导体电阻 R_b 为

$$R_b = \rho \frac{l}{A} \quad (\Omega) \tag{2.2-22}$$

式中： l 为导体长度，m； A 为导体截面积， m^2 ； ρ 为导体材料电阻率， $\Omega \cdot m$ 。

电导率 ρ 与导体温度有关，一般可写作

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \rho_{20} [1 + \alpha(\theta - 20)] \\ \rho &= \rho_0 (1 + \alpha\theta) \end{aligned} \right\} \tag{2.2-23}$$

式中： ρ_{20} 为导体在 $20^\circ C$ 时的电阻率， $\Omega \cdot m$ ； ρ_0 为导体在 $0^\circ C$ 时的电阻率， $\Omega \cdot m$ ； α 为电阻温度系数， K^{-1} ； θ 为导体温度， $^\circ C$ 。

常用金属材料的 ρ_{20} 和 α 见表 2.2-6。铜和铝导体在不同温度下的电阻率见表 2.2-7。

表 2.2-6 常用金属材料的 ρ_{20} 和 α

材 料	电阻率 ρ_{20} ($10^{-6} \Omega \cdot m$)	电阻温度系数 α ($10^{-3} K^{-1}$)
铜	0.017~0.018	4.33
黄铜	0.07~0.08	1.0~2.6
银	0.016	3.6
铝	0.029	3.8
硅铝合金	0.039	4
钢	0.103~0.137	5.7~6.2
灰铸铁	0.8~0.85	5.6
康铜	0.49	~0
镍铬 (80%Ni)	1.02~1.27	0.15
镍铬 (60%Ni, Cr15%)	1.02~1.18	0.17
铁铬铝	1.4	—

表 2.2-7 铜导体和铝导体在不同温度下的电阻率 ρ

温度 ($^\circ C$)	电阻率 ρ ($10^{-6} \Omega \cdot m$)	
	铜	铝
0	0.0165	0.0261
10	0.0172	0.0272
20	0.0178	0.0283
30	0.0185	0.0294
35	0.0188	0.0300
40	0.0192	0.0305
50	0.0200	0.0316
60	0.0206	0.0327
70	0.0212	0.0338
75	0.0216	0.0343
80	0.0219	0.0349
90	0.0226	0.0360
100	0.0233	0.0371

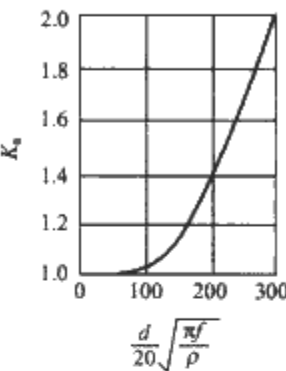


图 2.2-15 交流附加损耗系数
 d —导体直径，m；
 f —电流频率，Hz；
 ρ —电阻率， $\Omega \cdot m$

为了减少电阻损耗，断路器的回路电阻值要限制在一定数值以下。

断路器导电回路的集肤效应在一般情况下并不显著，可不用考虑， K_a 接近 1。只有当工作电流很大时集肤效应才比较显著。

3.2.2 铁磁损耗

电器中的载流导体有时要从铁磁零件附近通过。由于铁的磁导率高，磁通将通过铁磁零件形成闭路。如果导体通过的电流为交流，则交变磁通在铁磁体内产生涡流和磁滞损耗。在一般情况下，铁磁零件的横截面较大，涡流损耗占大部分，而磁滞损耗很小。

减小铁磁损耗常用的措施有：①采用非磁性材料，如无磁钢、无磁性铸铁、黄铜等；②采用非磁性间隙，在绕导电杆的环形铁件上开槽，在槽内填充黄铜或无磁钢等非磁性材料。

3.3 传热方式

传热有三种基本方式：热传导、对流和辐射。工程中遇到的传热现象通常是几种方式共同作用的结果。

3.3.1 热传导

导电体通过电流会使其温度升高，与其接触的其他零部件的温度也会升高。这种靠物体之间直接接触，或物体内部各部分之间发生的传热就是热传导。其机理是不同温度的物体或物体不同温度的各部分之间分子动能的相互传递，即动能较大（温度较高）的分子把能量传给邻近动能较小（温度较低）的分子。此外还能依靠自由电子运动来传递能量，热传导在固体、液体、气体中都可以进行。

分析热传导现象须用到傅里叶定律：单位时间内通过物体单位面积的热量与该处的温度梯度成正比，即

$$q = -\lambda \text{grad} \theta \tag{2.2-24}$$

式中： λ 为热导率；负号表示热量的传递方向与温度梯度相反，即向温度降低的方向传递。

热导率是表征物体传热能力的重要参数， λ 越大热传导能量越强。 λ 与材料、温度等许多因素有关。多数材料在一定的温度范围内 λ 与 θ 近似呈线性关系。不同物质在常温下的热导率见表 2.2-8 和表 2.2-9。

表 2.2-8 物质的热导率

绝热材料	$\lambda [W/(m \cdot K)]$	导热材料	$\lambda [W/(m \cdot K)]$
胶纸板	0.14	铜	392
电工纸板	0.18	银	420
变压器油	0.13	铝	204
浸油电工纸板	0.26	硅铝合金	160
棉织物 (未浸)	0.07	钨	160
棉织物 (浸漆)	0.11	黄铜	102
棉织物 (浸油)	0.09	铸铁	50
石棉板	0.74	钢	46
瓷	1.05	玻璃钢	0.40

表 2.2-9 空气和氢气的热导率

温度 (K)		250	393	300	320	350
热导率 [$10^{-2} W/(m \cdot K)$]	空气	2.21	2.37	2.55	2.68	2.89
	氢气	15.5	16.7	17.7	18.5	19.6

热传导现象与电学中的导电现象是相似的。在热传导中的各个量都可以在导电现象中找出对应量，如表 2.2-10 所示。

表 2.2-10 电传导与热传导的对应

电	电压 U	电流 I	电阻 R	电导率 σ	$U=IR$	电源
热	温升 τ	热流 Φ	热阻 R_t	热导率 λ	$\tau=\Phi R_t$	热源

3.3.2 热对流

如果在温度较高的导电杆周围有变压器油或空气等流体时，导电杆首先将热量通过热传导方式传给与它紧贴的流体层，即边界层。边界层流体受热后，体积膨胀，密度变化，向上流动，边界层以外未受热的、密度较大的流体流过来填充。填充来的流体又受热向上流动，如此循环，从导电杆表面不断带走热量，这种传热方式是对流换热。

对流换热与流体的流动有关。当流体内部存在温度差时，由于流体密度随温度改变而促使流体自由流动称为自然对流；依赖外力使流体强迫流动的称为强迫对流。对流换热仅在液体和气体中进行，它不仅决定于热的过程，而且决定于气体或液体的动力学过程。

对流换热在计算上采用牛顿提出的公式

$$\Phi = \alpha A (\theta_1 - \theta_2) \tag{2.2-25}$$

式中： A 为与流体接触的壁面面积， m^2 ； α 为对流换热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ； θ_1 为壁面温度， K ； θ_2 为流体平均温度， K 。

图 2.2-16 为牛顿公式的示意图。

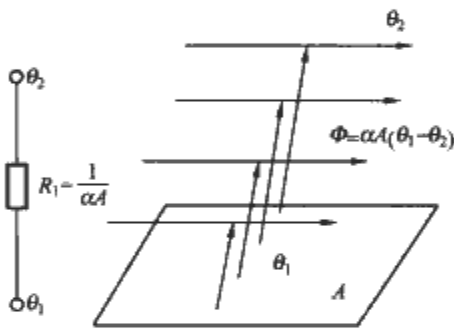


图 2.2-16 牛顿对流换热公式图示

由式 (2.2-25) 可知，热流量 Φ 与对流换热系数 α 成正比，也与壁面面积 A 及流体温度与壁面温度的温度差成正比。因此计算对流换热热量就变成如何根据各种具体情况计算对流换热系数 α 的问题。

对流换热是一个很复杂的现象，简单来说影响对流换热的因素有两方面：

- (1) 流体的物理性质，如密度、黏度、膨胀系数、热导率、比热容等。
- (2) 流体流动的情况，自然对流还是强迫对流，层流还是紊流。

对流换热不仅受导热规律的支配，也受到流体流动规律的支配。根据相似理论可以得到不同条件下的对流换热系数，其计算方法可参考传热学方面的书籍。

3.3.3 热辐射

在此只限于讨论由于温度差引起的电磁波传播，这种电磁波辐射称为热辐射。热辐射是一种依靠电磁波来传递能量的过程。热辐射比热传导和对流换热复杂得多。首先物体一部分热能转变为电磁波的能量，通过传递电磁波的介质，如空气、真空等向周围传出去。当电磁波遇到其他物体时，一部分电磁波的能量被其他物体吸收转变为热能，剩余的一部分能量则被反射回来。

热传导与对流换热都必须在发热体与其他物体或流体相互接触的情况下才能进行，但是电磁波的辐射则不同，热可以在真空中进行传递。

在真空或空气中，孤立物体在单位时间内辐射出去的辐

射能 Φ 决定于物体的性质、表面状况（如颜色、粗糙度等）、表面积大小及表面温度等。

理想的辐射体称为黑体，在单位时间内辐射出去的辐射能为

$$\Phi = \sigma_b A T^4 \tag{2.2-26}$$

式中： A 为物体的辐射表面积， m^2 ； T 为表面的热力学温度， K ； σ_b 为斯忒藩—玻尔兹曼常数，其值为 $5.67 \times 10^{-8} [W/(m^2 \cdot K^4)]$ 。

式 (2.2-26) 称为斯忒藩—玻尔兹曼定律。

两个物体间通过辐射交换的净换热量与 T^4 成正比，所以

$$\Phi = \sigma_b A (T_1^4 - T_2^4) \tag{2.2-27}$$

斯忒藩—玻尔兹曼定律只适用于黑体，其他类型的表面，如磨光的金属表面，辐射出的能量不像黑体那么多。考虑到这种表面性质，将另一因子 ϵ 引入式 (2.2-27)，可得

$$\Phi = \epsilon \sigma_b A (T_1^4 - T_2^4) \tag{2.2-28}$$

式中： ϵ 为表面黑度，也称辐射率。绝对黑体 $\epsilon=1$ ，一般物体 $\epsilon<1$ 。

物体表面颜色越深，越粗糙，辐射能力越强， ϵ 越接近 1。此外，实践表明，物体的黑度越大，接受辐射能力越强，反射能力越小。 $\epsilon=1$ 时，物体可以接受全部能量； $\epsilon=0$ 时，物体反射全部能量。不同物体表面状况的黑度见表 2.2-11。

表 2.2-11 物体的表面黑度

物体表面状况	ϵ	物体表面状况	ϵ
绝对黑体	1	抛光的铁	0.27
绿、灰黑漆	0.95	抛光的铜	0.15
涂釉瓷	0.92	抛光的铝	0.08
无光泽的铁	0.88		

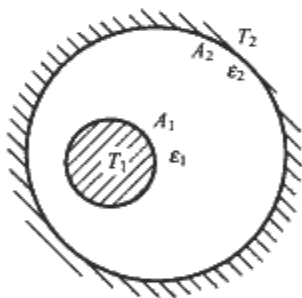


图 2.2-17 在有限空间内的辐射

在一般情况下，物体总是处在有限的空间内，如图 2.2-17 所示，热力学温度为 T_1 的物体 1 放置在热力学温度为 T_2 的物体 2 内，且 $T_1>T_2$ ，此时物体 1 所辐射出的能量必然全部落在物体 2 上被它所吸收，在此情况下由物体 1 经辐射传到物体 2 上的能量为

$$\Phi = \epsilon' \sigma_b A_1 (T_1^4 - T_2^4) \tag{2.2-29}$$

式中： ϵ' 为等效的黑度。

$$\epsilon' = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \tag{2.2-30}$$

式中： ϵ_1 、 ϵ_2 为物体 1 与 2 的黑度； A_1 、 A_2 为物体 1 与 2 的表面积。

图 2.2-18 所示的两个同心长圆柱体，其内圆柱 1 所辐射出的能量必然全部落在圆柱体 2 的内表面上，因而也可以应用式 (2.2-29) 来求解其辐射换热。若圆柱体是同心的，则可以用直径比 D_1/D_2 来代替面积比 A_1/A_2 。由式 (2.2-30) 可见，由于物体 2 的辐射和反射作用， $\epsilon'<\epsilon_1$ 。当求解一个凸面物体完全被一个非常大的凹面所包围的情况下换热时，式 (2.2-29) 非常重要。此时 $A_1/A_2 \rightarrow 0$ ，于是可以得到下面的简单关系式

$$\Phi = \epsilon_1 \sigma_b A_1 (T_1^4 - T_2^4) \tag{2.2-31}$$

应用这个方程很容易计算一个发热体在大房间内的辐射损失，

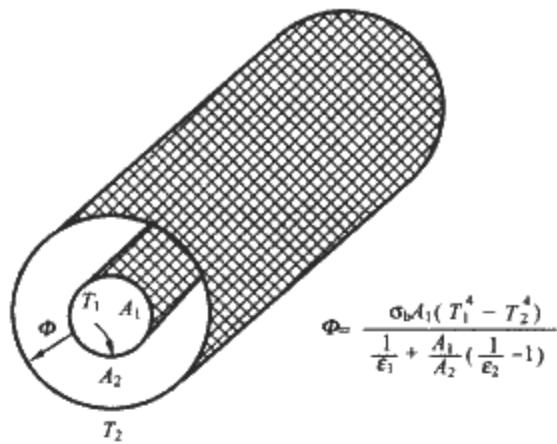


图 2.2-18 两圆柱表面的辐射换热

当热力学温度为 T_1 ，表面积为 A_1 的物体处在空间范围较大的温度为 T_2 的空气中，可用式 (2.2-31) 计算辐射换热。

3.3.4 实际传热情况

在传热的三种基本方式中，工程中遇到的传热现象通常是几种方式共同作用的结果，为了简便起见，常把三种传热方式合并在一起考虑，这就是工程上常用的进行电器发热计算的牛顿公式，它把三种传热方式全部统一于一个综合表面散热系数 K

$$\Phi = K S \tau \tag{2.2-32}$$

式中： S 为散热表面积， m^2 ； K 为表面散热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ 。

在电器中，牛顿公式主要用于电器载流导体和其他部分的发热近似计算。表面散热系数由实验确定，在一定温度范围内 K 取常数。对电器设备来说，不同表面及散热情况下的散热系数 K 见表 2.2-12。

表 2.2-12 表面散热系数 K

项目	表面情况	$K[W/(m^2 \cdot K)]$	附注
1	空气中，水平圆铜棒，直径 1~6cm	9~13	直径小的数值大
2	空气中铜母线，以狭边直立	6~9	
3	空气中涂绝缘漆的铸铁或钢表面	10~14	
4	油变阻器的平板形油箱	15~18	
5	空气中垂直、管状、烧釉电阻	21	
6	大尺寸的瓷罩，外表面(空气中)	3.7~5.6	计算、全部表面，温差 10~40K
7	纸绝缘的线圈：(1) 空气中 (2) 油中	10~12.5 25~36	
8	硅钢片铁心：(1) 空气中 (2) 油中	10~12.5 70~90	
9	瓷圆柱体，浸于油箱中	50~150	
10	大尺寸的瓷罩，内表面(油中)	46~92	温差 4~10K

3.4 长期工作发热

3.4.1 发热的计算

有些电器，比如断路器在其服役期间的绝大多数时间里都处于闭合状态，导通额定电流，此时的电器处于长期工作制下，其工作时间通常大于 8h，可以达到几天，甚至几个月。

下面分析以一个放置在空气中的载流长导体为例来说明长期工作制下的升温过程，如图 2.2-19 所示。

在 $t=0$ 以前，导体内无电流，导体温度 θ 与周围介质温度 θ_0 相同。在 $t=0$ 以后，导体通过电流 I ，产生功率损耗使导体温度升高。导体温度升高后， $\theta > \theta_0$ ，将有热量传

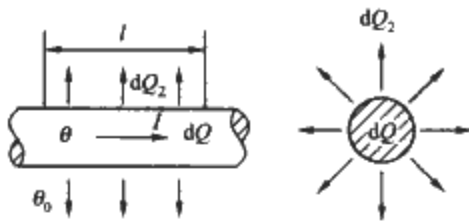


图 2.2-19 导体的升温

到周围介质中去。根据能量平衡原理，在 dt 时间内，导体各能量之间的关系可用下式表示

$$dQ = dQ_1 + dQ_2 \tag{2.2-33}$$

式中： dQ 为导体在 dt 时间内产生的损耗热量； dQ_1 为导体在 dt 时间内升温所需的热量； dQ_2 为导体在 dt 时间内传到周围介质中的热量。

由式 (2.2-33) 得

$$\Phi dt = C_t d\tau + \frac{\tau}{R_t} dt \tag{2.2-34}$$

式中： Φ 为热流量，按常数考虑； C_t 为导体热容量； R_t 为导体热阻； τ 为导体温升， $\tau = \theta - \theta_0$ 。

整理式 (2.2-34)，得

$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{C_t R_t} = \frac{\Phi}{C_t} \tag{2.2-35}$$

解式 (2.2-35) 得

$$\tau = \Phi R_t (1 - e^{-t/T_t}) \tag{2.2-36}$$

取

$$\tau_s = \Phi R_t \tag{2.2-37}$$

$$T_t = C_t R_t \tag{2.2-38}$$

式中： τ_s 为稳定温升， K ； T_t 为热时间常数， s 。

将式 (2.2-37)、式 (2.2-38) 代入式 (2.2-36) 中，得

$$\tau = \tau_s (1 - e^{-t/T_t}) \tag{2.2-39}$$

由式 (2.2-39) 可得导体温升 τ 的变化曲线如图 2.2-20 所示，也可将数据列表如表 2.2-13 所示。

表 2.2-13 温升曲线表

t	T_t	$2T_t$	$3T_t$	$4T_t$
τ	$0.63\tau_s$	$0.87\tau_s$	$0.95\tau_s$	$0.98\tau_s$

3.4.2 热时间常数

从图 2.2-20 和表 2.2-13 可以看出，从导体开始通电到发热基本稳定所需的时间只决定于时间常数。热时间常数 T_t 对发热过程的影响见图 2.2-21 所示。热时间常数越大，达到稳定温升的时间越长。

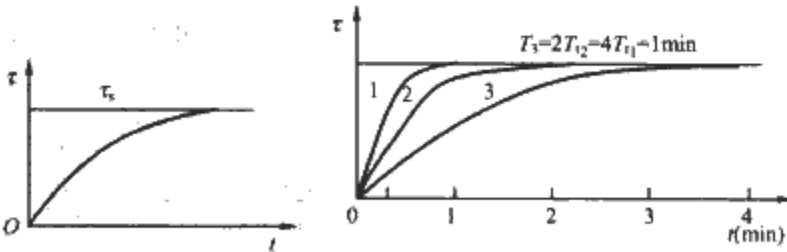


图 2.2-20 导体发热 图 2.2-21 不同热时间常数 T_t 的发热过程

对于放在空气中的裸导体， T_t 可写成

$$T_t = \frac{cG}{KS} \tag{2.2-40}$$

由式 (2.2-40) 可以看出导体的比热容 c 和重量 G 越大， T_t 越大；表面散热系数 K 及表面积 S 越大， T_t 越小。

3.4.3 稳定温升分布示例

外包绝缘层的圆导体，绝缘层内径为 r_1 ，外径为 r_2 ，导体稳态发热温度为 θ_1 ，绝缘层外表面温度为 θ_2 ，周围空气温度为 θ_0 ，则其稳态温升分布如图 2.2-22 所示。

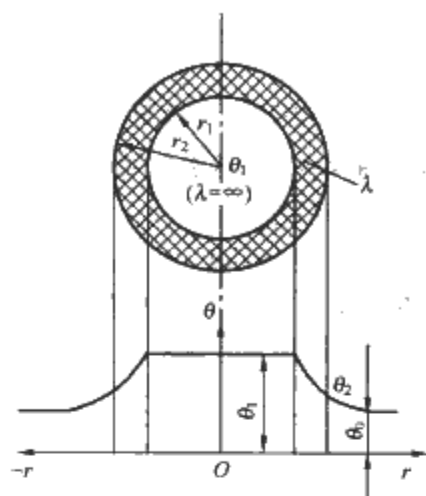


图 2.2-22 外包绝缘层的圆截面导体的热传导

对图 2.2-23 (a) 所示的变截面形状导体，其中 l_1 长的一段具有狭窄的截面 A_1 ，在达到稳态时沿导体轴向温升分布为一指数曲线，如图 2.2-23 (b) 所示。

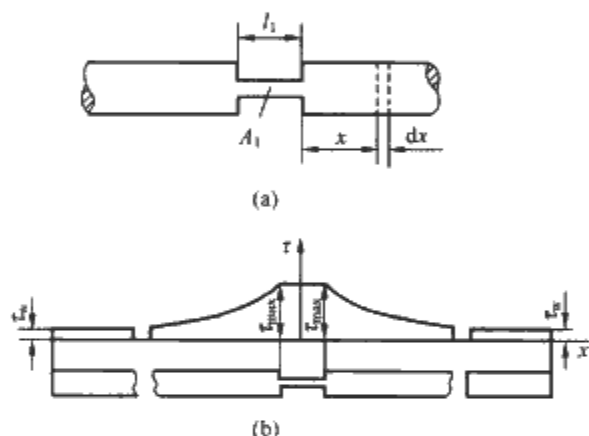


图 2.2-23 具有狭窄部分的变截面形状导体及其轴向温升分布

(a) 变截面形状导体；(b) 轴向温升分布

3.5 短路电流下的发热和热稳定性

断路器必须能经受短路电流的考验。在一定时间内断路器承受短路电流引起的热作用而不致损伤的能力称为断路器的热稳定性。短路时导体的热计算主要是校核其热稳定性。

导体通过短路电流的时间很短，只有几秒钟。在这么短的时间向外传出的热量很少，所以可以忽略这部分热量。这时，全部热能都储存在导体内，使导体温度升高，这种热量不向发热体以外发散的过程称为绝热过程。绝热过程中导体温度升高的计算方法如下：

设有一导体，长为 l ，截面积为 A ，如图 2.2-24 所示。从 $t=0$ 开始，流过短路电流 I_s ，产生的损耗为 P_0 ，导体在通电前温度为 θ_0 ，通电后温度为 θ 。由于短路时导体温度迅速增加，因而应考虑电阻率 ρ 随温度的变化，故损耗功率 P 不是一个常数。这时导体的能量平衡方程为

$$Pdt = C_t d\theta \quad (2.2-41)$$

式中： C_t 为导体的热容量，J/K。

热容量 C_t 的意义是导体温度每升高 1K 所需要的热量。 C_t 可由下式决定

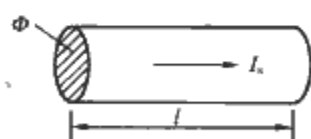


图 2.2-24 导体的发热

$$C_t = cm \quad (2.2-42)$$

式中： m 为导体的质量，kg； c 为导体材料的比热容，J/(kg·K)。 c 的意义是 1kg 材料每升高 1K 所需要的热量。几种常见材料的比热容 c 见表 2.2-14。

表 2.2-14 常用材料的比热容与密度

材 料	比热容 c [10 ³]/(kg·K)]	密 度 γ [10 ³ kg/m ³]
铜	0.39	8.9
银	0.23	10.5
黄铜	0.37	8.4~8.7
铝	0.88	2.7
钢	0.5	7.8
瓷	1.09	2.4
变压器油	1.04	0.9
胶纸板	1.48	1.3~1.4
镍铬 Ni80%	0.46	8.4
镍铬 Ni60%	0.418	8.2
铁铬铝 Cr25%	0.44	7.1
康铜	0.41	8.7~8.9

下面对于图 2.2-24 所示的长为 l ，截面积为 A 的导体进行热稳定性分析

$$P = I_{sw}^2 R = I_{sw}^2 \rho \frac{l}{A} \quad (2.2-43)$$

$$G = \gamma l A \quad (2.2-44)$$

式中： I_{sw} 为热稳定电流，A； R 为导体电阻， Ω ； ρ 为导体电阻率， $\Omega \cdot m$ ； l 为导体长度，m； A 为导体截面积，m²； γ 为导体密度，kg/m³。

导体电阻率可用下式计算

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \theta) \quad (2.2-45)$$

式中： α 为电阻温度系数； θ 为导体温度，℃； ρ_0 为 0℃ 时导体的电阻率。

对于交变电流应考虑交流附加损耗系数 K 。

将式 (2.2-42) ~ 式 (2.2-45) 代入式 (2.2-41) 得

$$I_{sw}^2 \rho_0 (1 + \alpha \theta) \frac{l}{A} dt = c \gamma A l d\theta \quad (2.2-46)$$

即

$$\frac{I_{sw}^2 \rho_0}{A^2 c \gamma} dt = \frac{d\theta}{1 + \alpha \theta}$$

在 $t=0$ 到 $t=t_{sw}$ 的时间范围内，温度由 $\theta=\theta_0$ 到 $\theta=\theta_{sw}$ 的条件下进行积分，即

$$\int_0^{t_{sw}} \frac{I_{sw}^2 \rho_0}{A^2 c \gamma} dt = \int_{\theta_0}^{\theta_{sw}} \frac{d\theta}{1 + \alpha \theta}$$

解之得

$$\theta_{sw} = \frac{1}{\alpha} \left[(1 + \alpha \theta_0) \exp \left(\frac{I_{sw}^2 t_{sw} \rho_0 \alpha}{A^2 c \gamma} \right) - 1 \right] \quad (2.2-47)$$

式中： θ_0 为起始温度，是周围环境温度与额定电流下的稳定温升之和。

电器的热稳定性以热稳定电流 I_{sw} 的二次方与热稳定时间的乘积，即 $I_{sw}^2 t_{sw}$ 来表示。由式 (2.2-47) 可以求出载流导体在允许发热温度 θ_{sw} 下的热稳定公式

$$I_{sw}^2 t_{sw} = \frac{\gamma A^2}{\rho_0 \alpha} \ln \left(\frac{1 + \alpha \theta_{sw}}{1 + \alpha \theta_0} \right) \quad (2.2-48)$$

在给定 t_{sw} 、 I_{sw} 和 θ_{sw} 条件下，导体截面积可由下式决定

$$A = \sqrt{\frac{I_{sw}^2 t_{sw} \rho_0 \alpha}{\gamma \ln \left(\frac{1 + \alpha \theta_{sw}}{1 + \alpha \theta_0} \right)}} \quad (2.2-49)$$

如果给定 A 、 θ_{sw} 和 t_{sw} ，则允许的热稳定电流

$$I_{sw} = \sqrt{\frac{\gamma A^2 \ln \left(\frac{1 + \alpha \theta_{sw}}{1 + \alpha \theta_0} \right)}{\rho_0 t_{sw} \alpha}} \tag{2.2-50}$$

当给定 A 、 θ_{sw} 和 I_{sw} ，则允许的热稳定时间可按式 (2.2-51) 求得

$$t_{sw} = \frac{\gamma A^2}{I_{sw}^2 \rho_0 \alpha} \ln \left(\frac{1 + \alpha \theta_{sw}}{1 + \alpha \theta_0} \right) \tag{2.2-51}$$

热稳定时间（额定短路持续时间）通常取 1s，2s，4s。

短路时允许的电流密度为

$$j_{sw} = \frac{I_{sw}}{A} = \sqrt{\frac{\gamma \ln \left(\frac{1 + \alpha \theta_{sw}}{1 + \alpha \theta_0} \right)}{\rho_0 t_{sw} \alpha}} \tag{2.2-52}$$

由式 (2.2-48) 可知，热稳定电流 I_{sw} 的二次方与热稳定时间 t_{sw} 的乘积 $I_{sw}^2 t_{sw}$ 为一常数，因而可得出下面关系式

$$\frac{I_{sw1}}{I_{sw2}} = \sqrt{\frac{t_{sw2}}{t_{sw1}}} \tag{2.2-53}$$

根据式 (2.2-53) 可将时间为 t_{sw1} 的热稳定电流 I_{sw1} 换算到时间为 t_{sw2} 的热稳定电流 I_{sw2} 。

表 2.2-15 给出了不同材料在不同的 t_{sw} 值时允许电流密度的经验值。

表 2.2-15 短路状态下允许的电流密度 A/cm ²			
材 料	热稳定时间 (s)		
	1	5	10
钢	15 200	6700	4800
铝	8000	4000	2800
黄铜	7300	3800	2700

4 电动力

4.1 电动力现象

当导体中流过电流时，在导体间就会产生电动力。电动力是电流的最基本和最明显的效应之一。当电动力失控时，可使得母线排弯曲，支撑绝缘子折断，在某些情况下使整个开关设备报废，这些都是电动力可能引起的灾难性后果。因为电动力与电流瞬时值的平方成正比，短路电流产生的电动力效应将更加严重，更具有破坏性。

作用在单位长度的导体上或开断装置触头上的电动力可能会超过几千牛，为了满足电动力的要求，变电站及其附属设备的设计有两种方案：方案一是系统的所有元件都要能够承受如此大的电动力；方案二是对电流路径进行巧妙设计，达到电动力补偿的效果。无论采用哪一种方案，都需要对导体上受到的电动力作用有一个基本的了解。

本章将要介绍一些最简单和最常用情况的电动力计算的实用方法，这些情况在开关设备中经常会遇到。对于较为复杂结构的电动力计算，可采用计算机软件进行分析。

4.2 动稳定性

电器能承受短路电流电动力的作用而不致破坏或产生永久变形的能力称为电器的电动稳定性。对于触头来说，短路电流通过时触头不应被电动力斥开和产生熔焊。电器的电动稳定性常用电器能承受的最大冲击电流的峰值来表示，也有用此峰值电流与额定电流的比值来表示。国家标准对各类电器的电动稳定性指标都有具体的规定。

对三相交流系统来说，短路的形式有单相短路、两相短路和三相短路。对于不同的短路形式，短路电流的大小和导

体间作用的电动力也不同。在现代电力系统中并不是所有的变压器中性点都接地，因此当短路接地点相同时，三相短路电流一般都比单相和两相短路电流大，即电器在电力系统中运行时，三相短路受到的电动力最大。因此一般都根据三相短路电流来校核电器的动稳定性。当然电力系统的具体结构不同，也可能有单相短路电流比三相短路电流大的情况，电动稳定性的原则是考虑系统短路电动力最大的情况来选择电器。

4.3 电动力方向

在介绍典型导体的电动力计算公式之前，首先针对一些最简单和最常用的情况了解一下电动力的方向。

如图 2.2-25 所示的 Y 和 Y' 两平行导体，其电动力满足“同向相吸，异向相斥”的原理。当其电流 i_y 和 $i_{y'}$ 同向时，其电动力指向另一导体，当电流方向相反时，电动力指向则背离另一导体。

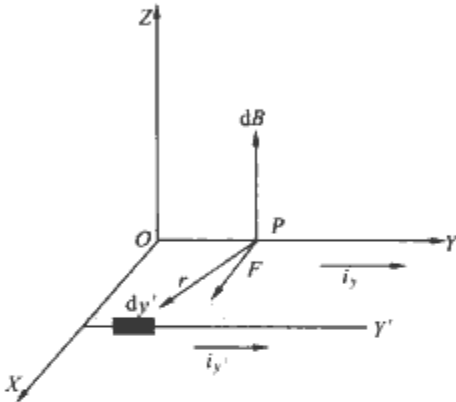


图 2.2-25 一对平行导体上电流、磁场和电动力

如图 2.2-26 所示的两个导体呈垂直布置时，导体上所受的电动力倾向于使该导体中电流的方向与另一导体中电流方向相同。

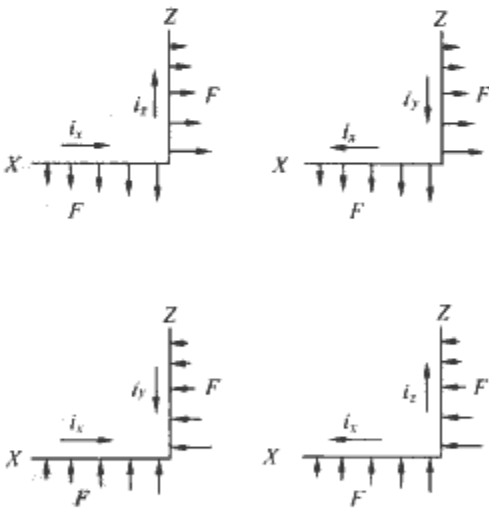


图 2.2-26 垂直布置导体上的电动力

一旦知道第一个导体对第二个导体的作用力，就可通过作用力与反作用力的关系知道第二个导体对第一个导体的力，当它受到斥力时它也施加一个斥力，当它受到拉力时它也施加一个拉力。

4.4 典型导体电动力计算

作用在导体上的力是电流与磁场相互作用的结果。事实上电流的单位安培就是由两根平行导线通过同向电流而引起的吸力来定义的，1A 就是当通过这个电流时相距 1m 远的两根导线产生的吸引力为 2×10^{-7} N/m。

导体上受到的电动力可由毕奥—沙伐定律来计算，电动力等于

$$\begin{aligned} \frac{F}{l} &= \frac{\mu_0 i_1 i_2}{2\pi d} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}) i_1 i_2}{2\pi d} \\ &= 2 \times 10^{-7} \frac{i_1 i_2}{d} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \end{aligned} \quad (2.2-54)$$

式中： F 为电力，N； l 为导体长度，m； d 为导体之间距离，m； i_1 、 i_2 为电流，A； μ_0 为磁导率常数， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ，Wb/(A·m)。

从上述方程可知，两个导体间的电力与导体中的电流 i_1 和 i_2 成正比，与磁导率常数成正比，还与导体间的几何位置所决定的常数成正比。正如前面所提到的，复杂几何形状的电力计算需要在计算机的帮助下才能完成。

一个导体上受到的总电力可以用导体上每一部分受到的力进行叠加得到，当然这每一部分的力并不单独存在，用每一段的力进行叠加只是为计算带来方便，在计算时要注意构成电流回路的每一段导体都要考虑到，不要遗漏。

母线排的电力计算是开关设备中最典型并且相对简单的情况，下面就此进行分析。

4.4.1 平行导体

当导体截面为圆形，且导体长度为无限长的情况下，毕奥—沙伐定律可直接用于计算平行导体间的电力。公式适用的条件是导体的长度与导体间距离的比大于10，在这种情况下计算误差小于10%，可以满足工程上确定导体强度的需要。

对于导体长度为有限长的情况下，可采用 Frick 给出的公式

$$F = 2 \times 10^{-7} \frac{i_1 i_2}{d} A l \quad (2.2-55)$$

式中

$$A = \frac{1}{2l} \left[\sqrt{4d^2 + (l+2x)^2} - \sqrt{4d^2 + (l-2x)^2} \right] \quad (2.2-56)$$

系数 A 还示于图 2.2-27 中，图中右上角的方框中示出导体的 l 和 x 以及它们之间距离 d 的关系。

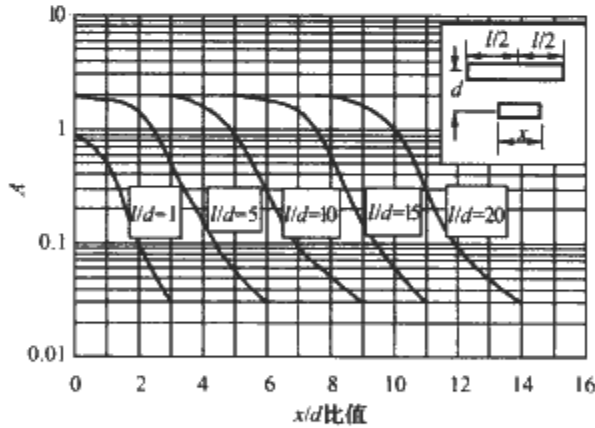


图 2.2-27 一对平行布置的短导体电力计算中的系数 A

截面为矩形的导体电力计算公式与圆截面导体一样，只是公式中要乘上一个截面因子 K 。形状因子中要考虑导体的宽度、厚度和导体间距离，并且要考虑电流并不一定集中在导体中心。由 Dwight 计算得到的截面因子 K 示于图 2.2-28 中。由图 2.2-28 中可以看出，当 $(d-h)/(h+b) > 2$ 时，导体形状引起的误差已经很小，可以不考虑截面因子的影响。

4.4.2 导体间有夹角

电力的方向已经在 4.3 节中介绍了，但是在此为了方便起见，还是要把电力方向的规律重新提一下：当一个垂直折弯的导体，电流从一臂流入，从另一臂流出，导体上的

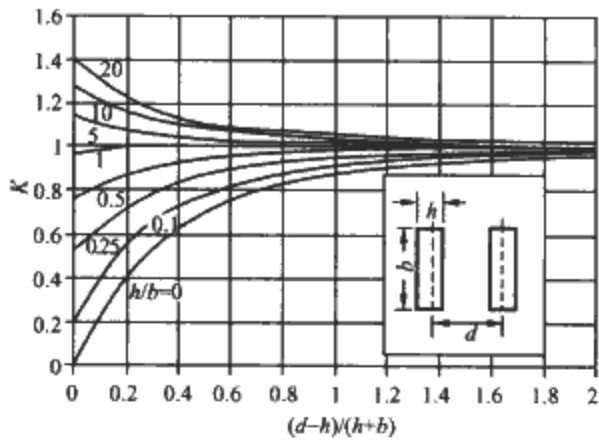


图 2.2-28 矩形截面平行导体的截面因子 K

电力指向折弯的外面，即试图使折弯拉直；当电流从折弯的两臂同时流入或同时流出时，导体上的电力指向折弯的里面，即试图使折弯并拢在一起。

当第一个导体与第二个导体呈垂直布置，第二个导体在距离转弯点为 y 处所受到的电力应力为

$$\frac{F}{l} = 1 \times 10^{-7} i_1 i_2 A \quad (\text{N/m}) \quad (2.2-57)$$

式中： $A = \frac{l}{y \sqrt{l^2 + y^2}}$ ，如图 2.2-29 所示。

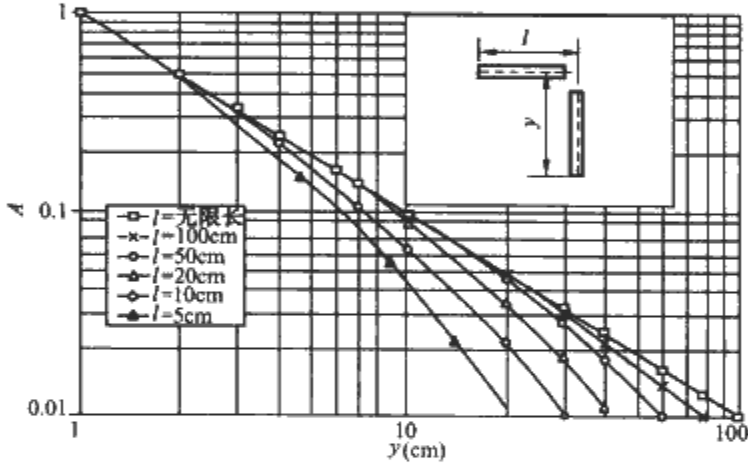


图 2.2-29 垂直布置导体中一个导体上的一点受到的电力产生应力计算中的系数 A

为了计算总电力相对于 o 点的转矩，对于 o 点位于折弯点的情况可用式 (2.2-58) 计算

$$M_o = 1 \times 10^{-7} i_1 i_2 D \quad (2.2-58)$$

式中： D 为系数，示于图 2.2-30 中。

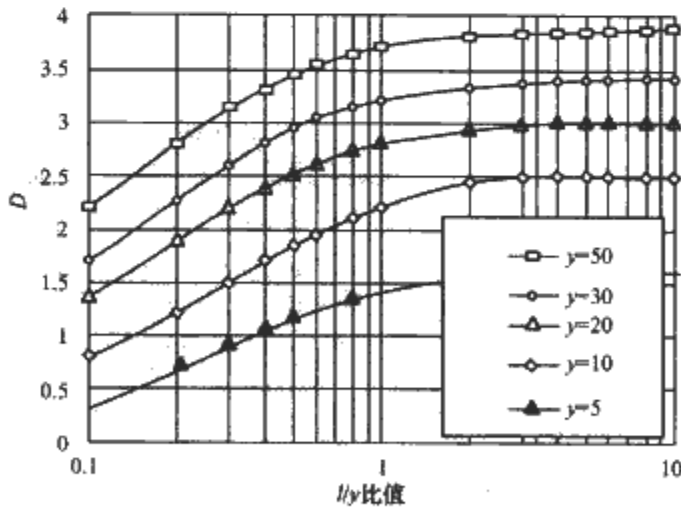


图 2.2-30 计算作用在导体上的力矩（相对于图 2.2-29 中 o 点）时所用的系数 D

4.4.3 触头间的电力斥力

从第 4.2 节知道电流在一对触头中流过时会收缩到一个很小的区域中，如图 2.2-31 所示。沿触头表面流动的电流会产生一个使触头斥开的力 F_B

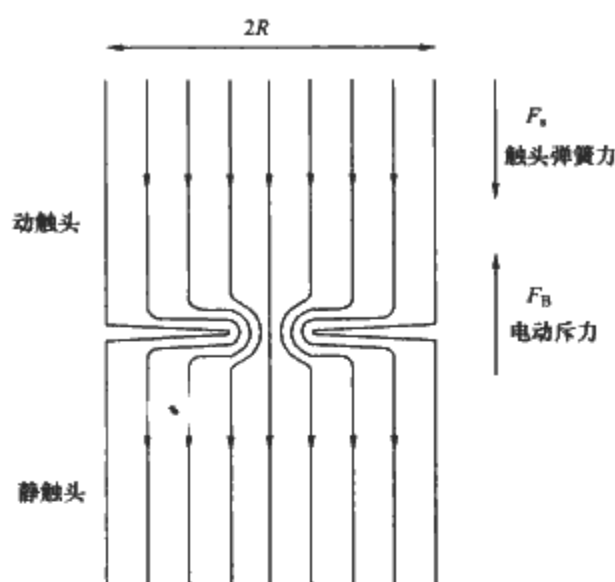


图 2.2-31 一个大电流通过触头斑点时产生斥力

$$F_B = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \frac{R}{a} \quad (2.2-59)$$

式中： μ_0 为真空中磁导率常数； I 为瞬时电流值； R 为触头半径； a 为收缩点半径平均值。

由于 $\ln \frac{R}{a} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{R}{a} \right)^2$ ，并借助于式 (2.2-59) 可得

$$F_B = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi} \ln \frac{HA}{F} \quad (2.2-60)$$

式中： A 为触头表面总面积。

式 (2.2-60) 的缺点在于当触头斥力增加时，触头压力 F 在减小。Barkan 对这个问题进行了分析，给出总触头压力 F 为

$$F = F_s + F_A - F_B \quad (2.2-61)$$

式中： F_s 为触头弹簧压紧力； F_A 为触头回路电动力。

触头回路电动力通常设计成能够部分抵消触头斥力，其表达式为

$$F_A = KI^2 \quad (2.2-62)$$

式中： K 为常数。

将式 (2.2-60) 中的 F 用式 (2.2-61) 代替得

$$F_B = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi} \ln \frac{HA}{F_s + F_A - F_B} \quad (2.2-63)$$

因为 F_B 出现在方程的两端，所以这是一个隐式方程，不易直接求解。Barkan 将式 (2.2-63) 变成如下形式

$$\exp\left(-\frac{8\pi}{\mu_0} \frac{F_B}{I^2}\right) = \frac{F_s + F_A - F_B}{HA} \quad (2.2-64)$$

Barkan 指出如果方程 (2.2-64) 的右端项 $= \alpha_1$ ，左端项 $= \beta_1$ ，那么当 $\alpha_1 = \beta_1$ 并且 $\frac{d\alpha_1}{dF_B} = \frac{d\beta_1}{dF_B}$ 时可得到式 (2.2-64)

的解。由 $\frac{d\alpha_1}{dF_B} = \frac{d\beta_1}{dF_B}$ 可得出

$$F_B = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi} \left(\ln \frac{8\pi HA}{\mu_0 I^2} \right) \quad (2.2-65)$$

将式 (2.2-65) 的 F_B 代入式 (2.2-64) 中，可得需要的最小触头弹簧力为

$$F_s = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi} \left(1 + \ln \frac{8\pi HA}{\mu_0 I^2} - \frac{8\pi}{\mu_0 I^2} F_A \right) \quad (2.2-66)$$

当触头为如图 2.2-31 所示的平板对接式情况时，此时 $F_A = 0$ ，这样方程 (2.2-66) 可简化成

$$F_s = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi} \left(1 + \ln \frac{8\pi HA}{\mu_0 I^2} \right) \quad (2.2-67)$$

图 2.2-32 示出在高真空中的平板对接式触头为克服触头斥力所需的触头弹簧力数据，由图 2.2-32 中可以看出，式 (2.2-67) 与实验结果相符很好。图 2.2-32 中由式 (2.2-

67) 所描述的克服触头斥力所需的触头弹簧力曲线可以用式 (2.2-68) 表示

$$F_s = 4.45 \times 10^{-7} I^2 \quad (\text{N}) \quad (2.2-68)$$

式中： I 为电流峰值，A。

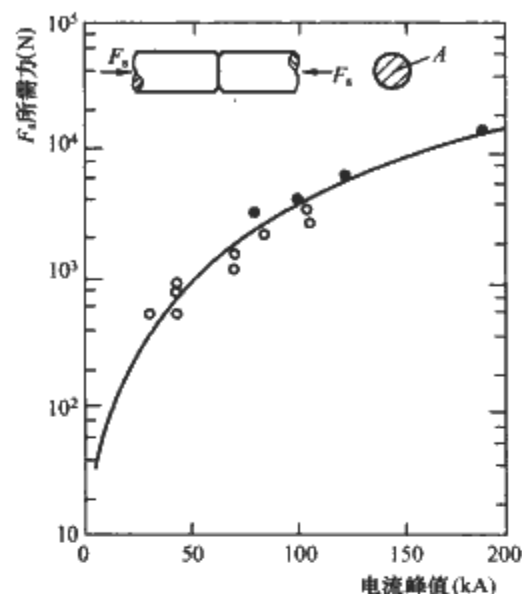


图 2.2-32 用以克服大电流通过平板对接触头的触头斥力所需的触头弹簧力

如果触头一旦被电动力斥开，则斥力随触头间隙的增加而迅速减小。但是如果触头斥力足够大，使得触头分开一定距离并产生电弧，则电弧区被加热的气体所产生的力足以维持触头处于这个开距下，这种触头间距离很近情况下产生的电弧有时叫做悬浮电弧，它能够使得触头材料严重磨损，还可能导致严重的触头熔焊。

4.5 三相电流电动力

当一个三相电路出现故障时，处于同一平面上相互平行且等间距的三根导体，由于导体间的相互作用，每一根导体上所受到的力为：

导体 1 上所受到的力等于导体 2 对其所施加的力加上导体 3 对其所施加的力，($F_1 = F_{1,2} + F_{1,3}$)。

导体 2 上所受到的力等于导体 3 对其所施加的力减去导体 1 对其所施加的力，($F_2 = F_{2,3} - F_{2,1}$)。

导体 3 上所受到的力等于导体 1 对其所施加的力加上导体 2 对其所施加的力，($F_3 = F_{3,1} + F_{3,2}$)。

当对这些力进行计算后可以得到其最大值。假定三根导体从左到右其电流相序为 1, 2, 3，第 1 相的电流超前于第 2 相电流，第 2 相电流超前于第 3 相电流，这样可以得到如下结果：

外侧导体上的最大电动力为

$$F_1 \text{ 与 } F_3(\max) = 12.9 \times 10^{-7} \left(\frac{i_r^2}{d} \right) \quad (\text{N/m}) \quad (2.2-69)$$

中间导体上的最大电动力为：

$$F_2(\max) = 13.9 \times 10^{-7} \left(\frac{i_r^2}{d} \right) \quad (\text{N/m}) \quad (2.2-70)$$

式中： i_r 为对称电流有效值； d 为中间导体与外侧导体的中心距。

图 2.2-33 和图 2.2-34 分别对应于短路故障出现在两侧导体上和中间导体上的情况。

从图 2.2-33 中可以看出，三相导体中的任意一相都是在发生短路后的半个周期达到电动力最大值。两侧导体的电动力最大值相同。

从图 2.2-34 中可以看出，对于中间导体（导体 2），当短路发生在电流过零前或过零后 45° 电角度时，其电动力

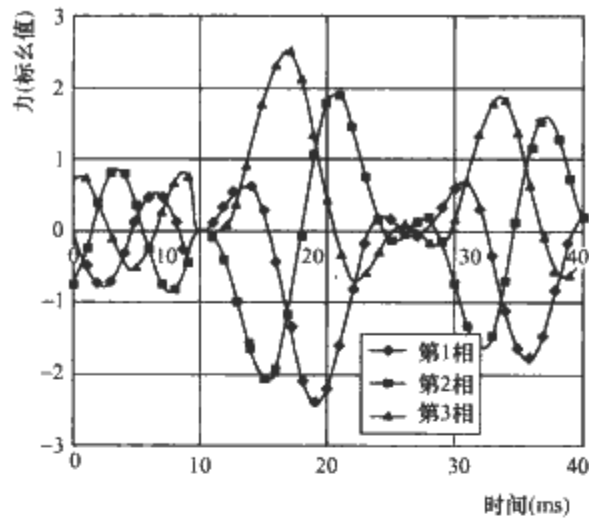


图 2.2-33 三相平行布置导体受到的电动力在第 1 相导体电流过零后 75°时发生短路

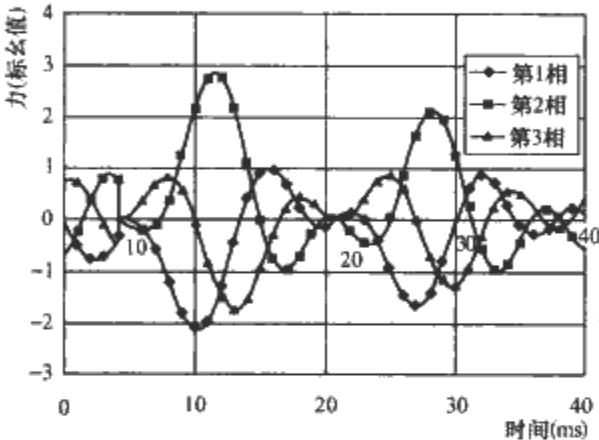


图 2.2-34 三相平行布置导体受到的电动力在第 2 相 (中间相) 导体电流过零前 45°时发生短路

会达到最大值。中间相导体电动力最大值是三相平行布置导体中最大的。

对于导体呈三相对称布置的情况，如等边三角形布置，每一相导体上的电动力最大值都是

$$F = 13.9 \times 10^{-7} \left(\frac{i_1^2}{d} \right) \quad (\text{N/m}) \quad (2.2-71)$$

这种布置下的任何一个导体，在这一相电流过零前或过零后 90°电角度时发生短路，就会出现电动力最大值。电动力最大值出现在短路发生后的 180°电角度，或半个周期时刻。在这种情况下任一导体上的最大电动力方向垂直于其他两个导体所决定的平面，方向朝外。

5 低压电器电磁系统理论与计算

电磁系统是由磁系统和线圈组成，用以进行电磁转换的电器组件或部件。电器的电磁系统主要是线圈从电源吸取能量励磁，使磁系统磁化，产生电磁吸力吸引衔铁，使之运动作机械功以达到预定目的。

电磁系统种类很多，按线圈励磁电流的种类区分有直流电磁系统、单相交流电磁系统、三相交流电磁系统、极化电磁系统以及交直流同时磁化的电磁系统。按线圈的连接方式区分有并励电磁系统和串励电磁系统。按衔铁与线圈的相对位置区分有衔铁穿入线圈内腔的内衔铁式电磁系统和衔铁在线圈外运动的外衔铁式电磁系统。按外观形状区分有 E 形电磁系统、螺管式电磁系统和拍合式电磁系统等。

电磁系统的线圈通电后，在周围空间建立了一个磁场，电磁系统的计算实质上是其磁场的计算。由于电磁系统的磁场大都是三维场，因此很难通过解析法进行计算，对电磁系统的计算主要有磁场方法和磁路方法。

5.1 磁路分析与计算

5.1.1 磁路基本概念

5.1.1.1 磁路概念

磁路作为一种简化的电磁系统计算方法，目前在工程计算中应用还比较广泛。将磁通看成在磁通管内流动着的物质，就像电流在电导体中流动一样，因此磁通相当于电流，磁通管相当于载流导体，磁场就相当于类似电路的磁路，这样就将磁场路化。对于绝大多数工程电磁系统的磁场，以磁导率非常大的铁磁材料作为磁通的主要路径，磁场中的磁通基本上是沿着磁导体形成的接近于闭合的回路流动，因此可以将磁导体的外壁看成磁通管，根据磁导体的几何参数计算磁路各段的磁阻，就利用磁路的概念将磁场问题变换成磁路问题，磁场的计算就可以根据磁路的基本定律进行计算，从而使电磁系统的计算大为简化。

5.1.1.2 磁路计算的基本定律

由磁通连续性定理导出磁路基尔霍夫第一定律

$$\sum \Phi = 0 \quad (2.2-72)$$

式 (2.2-72) 表明：对于磁路中的任一节点，进入该点的磁通之和等于自该点流出的磁通之和。

由安培环路定律导出磁路基尔霍夫第二定律

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k R_{mk} = \sum_{j=1}^m (iN)_j \quad (2.2-73)$$

式 (2.2-73) 表明：对于磁路中的任一闭合回路，磁通势的代数和等于该回路各段上磁压降的代数和。

磁路欧姆定律

$$U_m = \Phi R_m \quad (2.2-74)$$

式 (2.2-74) 表明：磁路两端的磁压降等于通过磁路的磁通与其磁阻的乘积。

5.1.1.3 磁路与电路的异同

磁路与电路有许多相同之处，表现在：磁路中的磁通势、磁通、磁压降、磁阻、磁阻抗等参量与电路中的电动势、电流、电压降、电阻和阻抗等参量一一对应。磁路欧姆定律和基尔霍夫定律与电路的同名定律之间也存在对应关系。然而，磁路和电路之间有本质上的差异。电路是带电粒子实际运动的路径，其中确有带电粒子作定向运动；磁路和磁通是借以分析磁场问题的一种手段，并没有实体的磁通。

5.1.1.4 磁路的特点

- (1) 由于磁导体的相对磁导率通常并非常数，而是磁感应强度 B 的函数，因此一般磁路是非线性的。
- (2) 磁导体与一般媒质的磁导率比值通常只有 $10^3 \sim 10^4$ ，工程计算中忽略漏磁通会给计算带来较大误差。
- (3) 磁通和漏磁通不会产生焦耳热损耗。
- (4) 磁导体外部的磁通管的几何参数一般均属未知，与它相关的磁路参数应根据磁场的基本性质和基本定律确定。
- (5) 由于必须考虑漏磁通，磁路中的磁通势和磁阻都是分布参数，因此磁路是分布参数性质的路。

5.1.2 气隙磁导的计算

电器中各种型式的电磁系统一般都具有空气隙，气隙磁导的大小取决于构成气隙的极面的几何形状和相对位置，以及气隙的磁场分布情况。由于气隙磁场分布比较复杂，准确计算气隙磁导是非常困难的。为了简化计算，工程上常假定：①空气的磁导率等于真空的磁导率；②把导磁体表面看作等磁位面，磁力线都垂直于导磁体表面。

气隙磁导计算的准确度，对磁路计算的结果影响很大。在设计计算中常用解析法和分割磁场法计算气隙磁导。尽管

磁导体部分的磁路长度比气隙大得多，但由于空气的磁导率仅为磁导体的 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ ，因此气隙磁阻远比磁导体的大。要准确计算磁路，首先必须准确计算气隙磁导。下面讨论气隙磁导的计算。

应用解析方法，对于磁极间的磁力线均匀分布的理想情况，可以通过式 (2.2-75) 计算气隙磁导

$$\Lambda_{\delta} = \frac{\mu_0 A}{\delta} \tag{2.2-75}$$

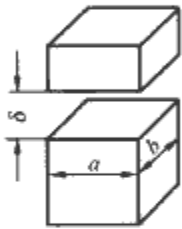
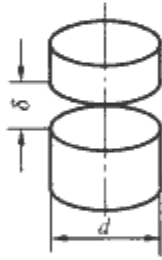
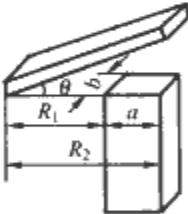
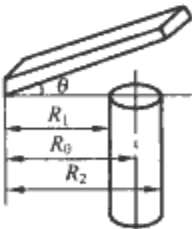
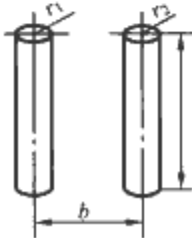
式中： Λ_{δ} 为气隙磁导； δ 为气隙长度； A 为气隙截面积； μ_0 为空气隙的导磁系数。

实际上由于气隙间的磁力线相互排挤，磁通向外扩散，磁极的边缘部分磁力线分布不均匀，按式 (2.2-75) 计算气隙磁导就会带来较大误差。但式 (2.2-75) 是计算气隙磁导

的基础，若磁极形状为规则的几何形状、气隙内的磁通和等位线分布均匀、而且忽略磁极的边缘效应及磁通的扩散，可以运用磁场理论和数学推导直接求得气隙磁导的计算公式，如表 2.2-16 所示。

当磁极几何形状比较复杂，通常采用磁场分割法来计算气隙磁导，磁场分割法是首先确定磁极之间气隙磁场的分布规律，估计磁通的可能路径，将整个气隙磁场划分为若干个有规则形状的磁通管，分别按式 (2.2-75) 求出磁导，最后根据磁通管的串并联关系得出整个气隙的磁导。磁场分割法满足工程计算所需准确度，并且计算方便，在电磁系统设计计算中广泛应用。表 2.2-16 和表 2.2-17 中列出各种常见磁极磁导的计算公式，便于计算时查取。

表 2.2-16 用解析法推导的气隙磁导计算公式

序号	几何图形	边极形状	磁导公式	备注
1		平行矩形磁极	当 $\frac{\delta}{a} \leq 0.2$ 和 $\frac{\delta}{b} \leq 0.2$ 时 $G_{\delta} = \mu_0 \frac{ab}{\delta}$ 当 $\frac{\delta}{a}$ 或 $\frac{\delta}{b} > 0.2$ 时 $G_{\delta} = \mu_0 \frac{(a+k\delta)(b+k\delta)}{\delta}$ $k = \frac{0.307}{\pi}$	适用于磁场均匀分布，不考虑边缘磁通的扩散磁导 适用于 δ 较大时，考虑了边缘磁通的扩散磁导
2		平行圆形磁极	当 $\frac{\delta}{d} \leq 0.2$ 时 $G_{\delta} = \mu_0 \frac{\pi d^2}{4\delta}$ 当 $\frac{\delta}{d} > 0.2$ 时 $G_{\delta} = \mu_0 \frac{(0.886d+k\delta)^2}{\delta}$ $k = \frac{0.307}{\pi}$	适用于磁场均匀分布，不考虑边缘磁通的扩散磁导 适用于 δ 较大时，考虑了边缘磁通的扩散磁导
3		矩形铁心与平板衔铁	$G_{\delta} = \mu_0 \frac{b}{\delta} \ln \frac{R_2}{R_1}$ θ —弧度	适用于 δ 比磁极尺寸甚小时，不考虑边缘磁通的扩散磁导
4		圆形铁心与平板衔铁	$G_{\delta} = \mu_0 \frac{2\pi}{\theta} (R_0 - \sqrt{R_1 R_2})$ θ —弧度 $G_{\delta} \approx \mu_0 \frac{2\pi R_0}{\theta} (R_0 - \sqrt{R_1 R_2})$ δ —气隙平均长度	适用于 δ 比磁极尺寸甚小时，不考虑边缘磁通的扩散磁导
5		两平行圆柱体	$G_{\delta} = \mu_0 \frac{2\pi l}{\ln(k + \sqrt{k^2 - 1})}$ 当 $r_1 \neq r_2$ 时 $k = \frac{b^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_2}$ 当 $r_1 = r_2 = r$ 时 $k = \frac{b^2 - 2r^2}{2r^2}$ 当 $b > 8r$ 时 $G_{\delta} = \mu_0 \frac{\pi l}{\ln \frac{b}{r}}$	适用于铁心直径比铁心长度甚小时

续表

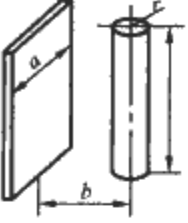
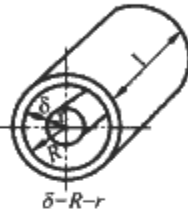
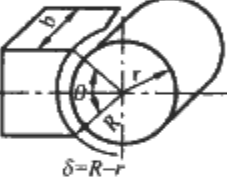
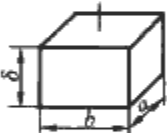





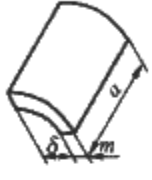

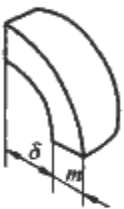
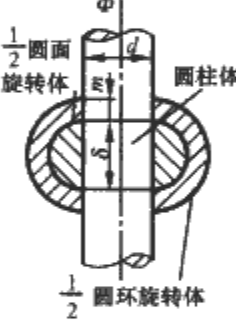
序号	几何图形	边极形状	磁导公式	备注
6		圆柱体与平行平面	当 $a > 4b$ 时 $G_{\delta} = \mu_0 \frac{2\pi l}{\ln \frac{b + \sqrt{b^2 - r^2}}{r}}$ 当 $b > 4r$ 时 $G_{\delta} = \mu_0 \frac{2\pi l}{\ln \frac{2b}{r}}$	
7		两同心圆面	$G_{\delta} = \mu_0 \frac{2\pi l}{\ln \frac{R}{r}}$ 当 $r > \delta$ 时 $G_{\delta} = \mu_0 \frac{2\pi(r + \frac{\delta}{2})l}{\delta}$	不考虑端部边缘磁通的扩散磁导
8		两同心圆弧面	$G_{\delta} = \mu_0 \frac{\theta b}{\ln \frac{R}{r}}$ 当 $r > \delta$ 时 $G_{\delta} = \mu_0 \frac{\theta(r + \frac{\delta}{2})b}{2\delta}$	

表 2.2-17 若干磁通管的气隙磁导计算公式

序号	几何图形	名称	磁导计算公式
1		长方形	$G = \mu_0 \frac{ab}{\delta}$
2		$\frac{1}{2}$ 圆柱体	用作图法求得 $\rho_{\delta} = 1.22\delta$ $V = \frac{\pi\delta^2 a}{2}$ $G = \mu_0 \frac{V}{\delta_{\delta}^2} = 0.264\mu_0 a$
3		$\frac{1}{2}$ 空心圆柱体	$\delta_{\delta} = \frac{\pi(\delta + m)}{2}$ $S_{\delta} = ma$ $G = \mu_0 \frac{S_{\delta}}{\delta_{\delta}} = \mu_0 \frac{2a}{\pi(\frac{\delta}{m} + 1)}$
4		$\frac{1}{4}$ 球体	用作图法求得 $\rho_{\delta} = 1.3\delta$ $V = \frac{1}{4} \left[\frac{4}{3} \pi \left(\frac{\delta}{2} \right)^3 \right]$ $G = \mu_0 \frac{V}{\delta_{\delta}^2} = 0.077\mu_0 \delta$
5		$\frac{1}{4}$ 空心球体	$\delta_{\delta} = \frac{\pi(\delta + m)}{2}$ $S_{\delta} = \frac{1}{2} \left[\frac{\pi}{4} \left(\frac{\delta}{2} + m \right)^2 - \frac{\pi}{4} \left(\frac{\delta}{2} \right)^2 \right]$ $G = \mu_0 \frac{S_{\delta}}{\delta_{\delta}} = 0.25\mu_0 m$

续表

序 号	几 何 图 形	名 称	磁导计算公式
6		$\frac{1}{4}$ 圆柱体	用作图法求得 $\rho_{pi} = 1.22\delta$ $V = \frac{\pi\delta^2 a}{4}$ $G = \mu_0 \frac{V}{\delta_{pi}^2} = 0.528\mu_0 a$
7		$\frac{1}{4}$ 空心圆柱体	$\delta_{pi} = \frac{\pi(2\delta+m)}{4}$ $S_{pi} = ma$ $G = \mu_0 \frac{S_{pi}}{\delta_{pi}} = \mu_0 \frac{2a}{\pi(\frac{\delta}{m} + 0.5)}$
8		$\frac{1}{8}$ 球体	用作图法求得 $\rho_{pi} = 1.3\delta$ $V = \frac{1}{8}(\frac{4}{3}\pi\delta^3)$ $G = \mu_0 \frac{V}{\delta_{pi}^2} = 0.308\mu_0 \delta$
9		$\frac{1}{8}$ 空心球体	$\delta_{pi} = \frac{\pi(2\delta+m)}{4}$ $S_{pi} = \frac{1}{2}[\frac{\pi}{4}(\frac{\delta}{2}+m)^2 - \frac{\pi}{4}\delta^2]$ $G = \mu_0 \frac{S_{pi}}{\delta_{pi}} = 0.5\mu_0 m$
10		圆柱体	$G = \mu_0 \frac{\pi d^2}{4\delta}$
11		$\frac{1}{2}$ 圆面旋转体	平均长度 $l_{pi} = \pi(d + \frac{\delta}{2})$ $G = 0.264\mu_0 l_{pi} = 0.829\mu_0(d + \frac{\delta}{2})$
12		$\frac{1}{2}$ 圆环旋转体	平均长度 $l_{pi} = \pi(d + \delta)$ $G = \mu_0 \frac{2l_{pi}}{\pi(\frac{\delta}{m} + 1)} = \mu_0 \frac{2(d + \delta)}{\frac{\delta}{m} + 1}$
13		$\frac{1}{4}$ 圆面旋转体	平均长度 $l_{pi} = \pi(d + \delta)$ $G = 0.528\mu_0 l_{pi} = 1.658\mu_0(d + \delta)$
14		$\frac{1}{4}$ 圆环旋转体	平均长度 $l_{pi} = \pi(d + 2\delta)$ $G = \mu_0 \frac{2l_{pi}}{\pi(\frac{\delta}{m} + 0.5)} = \mu_0 \frac{2(d + 2\delta)}{\frac{\delta}{m} + 0.5}$

5.1.3 直流磁路分析与计算

磁路计算的复杂性就在于漏磁分布性和铁心磁阻的非线性，同时漏磁的分布性使得铁心磁阻也带有分布性，铁心磁阻的非线性又使得漏磁计算也在非线性问题中考虑。另外，作为场源的套于铁心柱上的励磁绕组产生的磁通势也是沿铁心长度分布的。因此，磁路是兼具分布性和非线性的路，求解比较困难，一般采用近似方法求解。

5.1.3.1 漏磁通的处理

漏磁通的路径和分布规律在磁路计算中比较重要，因为等效磁路主要根据它作出。但漏磁通的分布异常复杂，而且随电磁系统结构不同而异，没有通用的方法准确确定漏磁通的路径和分布，近似的方法有：

- (1) 实验法，当电磁系统具有实物或模型时，可通过实验大致确定漏磁通的路径和分布情况。
- (2) 作磁位分布图形法，根据参考点画出磁通势、磁路上的磁压降和磁位分布图，则存在磁位差的空间必定有漏磁

通，即可确定漏磁通的分布。

(3) 运用磁场图景的方法，根据磁场性质描绘磁场图景，确定漏磁通的路径和分布规律。

5.1.3.2 直流磁路的计算

对于大多数实际电磁系统的漏磁，将其看成集中的参量方便计算，此时等效磁路是多回路的非线性磁路，可以借鉴求解复杂直流电路的节点电位法、回路电流法，采用节点磁位法和回路磁通法进行计算。

直流磁路的特点是在稳定工作时，线圈中的励磁电流 I 与工作气隙 δ 的大小无关，即线圈磁通势 IN 等于常数。

在电磁系统的结构尺寸给定的情况下，直流磁路计算的任务有两类：

- (1) 已知工作气隙磁通 Φ_δ ，求线圈磁通势 IN 。
 - (2) 已知线圈磁通势 IN ，求工作气隙磁通 Φ_δ 。
- 由于磁路的分布性和非线性，工程上一般采用分段法和漏磁系数法计算直流磁路。

分段法是将分布参数磁路简化为若干个集中参数磁路的计算方法,由于磁路的分布性,磁导体材料的磁导率在整个磁路中处处不同,因此将电磁系统分成若干段,在每一段内将磁通势和漏磁通都看成集中参量进行计算。分段法的实质是认为磁导体中各段内的磁通不变,这样方便非线性磁阻的计算。分段数越多,计算结果越准确,但计算工作量也越大,因此在计算时根据实际情况选择合适的分段数即可。分段法适合当磁路各部分截面积不等,或单位长度漏磁导非常大的情况。

漏磁系数法是工程上常用的比较简便的近似计算方法,漏磁系数是指铁心中任一截面内的磁通与气隙磁通之比。在铁心柱的任一截面内,其磁通可表示为气隙磁通和该处至气隙的全部漏磁通之和,即

$$\Phi_y = \Phi_\delta + \Phi_\sigma = \sigma_y \Phi_\delta \quad (2.2-76)$$

式中: σ_y 为漏磁系数。

下面通过一个实例介绍漏磁系数法的应用。如图 2.2-35 所示的拍合式电磁系统,由于线圈磁通势是分布的,考虑漏磁通,则沿铁心和铁轭的高度,导磁体各处的磁通是不同的。为便于计算,将铁心底部的总磁通 Φ_0 对工作气隙磁通 Φ_δ 的比值定义为漏磁系数。忽略铁磁体和非工作气隙磁阻时的等效磁路如图 2.2-36 所示。

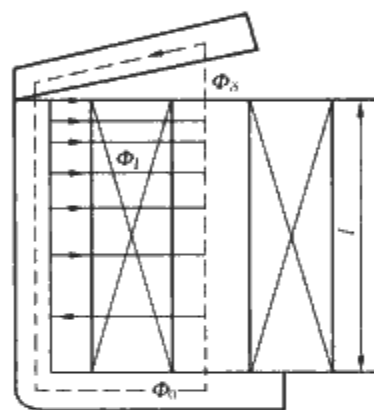


图 2.2-35 拍合式电磁系统磁通分布

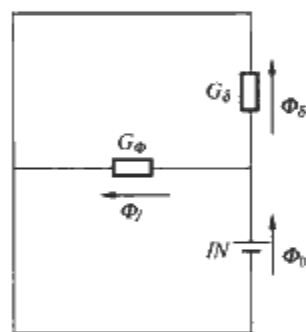


图 2.2-36 等效磁路

图 2.2-36 中用一个集中磁通势 IN 代替实际上分布的线圈磁通势,用一个靠近工作气隙处的集中漏磁导 G_σ 按漏磁通不变的原则等效分布的漏磁导,因此

$$G_\sigma = \frac{gl}{2} \quad (2.2-77)$$

式中: g 为铁心单位长度的漏磁导; l 为产生漏磁的铁心长度。

漏磁系数

$$\sigma = \frac{\Phi_0}{\Phi_\delta} = \frac{\Phi_\delta + \Phi_\sigma}{\Phi_\delta} = \frac{G_\sigma + G_\delta}{G_\delta} = 1 + \frac{G_\sigma}{G_\delta} \quad (2.2-78)$$

首先根据气隙大小计算工作气隙、非工作气隙磁导和铁心单位长度漏磁导,根据上式计算漏磁系数。

对已知工作气隙磁通 Φ_δ ,求线圈磁通势 IN 的正求问题,根据气隙的磁通和漏磁系数可以计算铁磁体的磁通,根据磁路欧姆定律,由磁通和磁路长度计算铁磁体上的磁压降,以及工作气隙和非工作气隙的磁压降,最后利用安培环路定律计算线圈磁通势 IN 。

对已知线圈磁通势 IN ,求工作气隙磁通 Φ_δ 的反求问题,先假设一气隙磁通求线圈磁通势,根据结果调整假设值,辅之以作图,即可求解。

5.1.4 交流磁路分析与计算

5.1.4.1 交流磁路的特点

(1) 交流磁路中的电压、电流和磁通都是交变的。为了

简化计算,认为它们的波形都是正弦的。磁路计算时,磁通和磁通密度用幅值表示;电压、电流、磁通势和磁场强度均用有效值表示。

(2) 由于交变磁通的作用,在导磁体中产生磁滞和涡流损耗使磁通与励磁电流不同相。磁路计算时,磁路的欧姆定律和基尔霍夫两定律仍然适用,但应采用复数形式。

(3) 对于交流并励电磁系统,由于外加电压是固定的,因此磁链基本上是固定的,不随工作气隙的大小变化,而线圈电流则与气隙大小有关。

5.1.4.2 交流磁路的计算方法和分析方法

交流磁路的计算方法大体上与直流磁路相同,但有其特点。对于交流串励交流电磁系统,线圈电流不随气隙改变,其磁路计算方法与直流磁路完全相同。而交流并励电磁系统为恒磁链系统,其磁路计算方法不同于直流磁路计算方法。

交流磁路的分析方法有等效正弦波法和波形分析法。等效正弦波法适用于铁心未充分饱和或气隙较大,波形畸变不严重的情况,通过有效值相等的正弦波电压(电流)表示畸变的电压(电流)。分析时磁路的各种参数均以相量和复数表示。波形分析法适用于无气隙且经常工作于饱和状态的磁路,特别是磁导体具有接近于矩形或直角形动态磁滞回线的磁路。

5.1.4.3 交流并励电磁系统的计算任务

(1) 已知工作气隙磁通 Φ_δ ,求线圈磁通势 IN 。

(2) 已知电源电压 U ,线圈匝数 N ,求工作气隙磁通 Φ_δ 和线圈磁通势 IN 。

对于任务(1),首先是作等效磁路图,计算全部的磁阻和磁抗,由计算的磁阻、磁抗和已知的磁通,根据交流磁路欧姆定律计算漏磁导两端的磁压降,根据基尔霍夫定律计算各部分磁通,最后由交流磁路的安培环路定律计算线圈磁通势。

对于任务(2),先根据给定的 U 值,按 $U = 4.44 f N \Phi_m$ 先假设一个气隙磁通值,然后按正求任务计算 U ,将所得 U 值与给定的 U 值加以比较,不断调整假设值,直到二者相等或满足准确度要求即可。

5.2 电磁系统吸力特性计算

5.2.1 电磁吸力的计算

众所周知,磁场对位于其中的运动电荷和载流导体有力的作用,电磁系统的吸力计算通常采用能量平衡公式和麦克斯韦公式。

5.2.1.1 能量平衡公式

根据电磁系统的能量平衡关系,并假设线圈电流 I 和磁链 ψ 为线性关系,可得出计算吸力的一般公式为

$$F = -\frac{1}{2} \left(I \frac{d\psi}{d\delta} - \psi \frac{dI}{d\delta} \right) \quad (\text{N}) \quad (2.2-79)$$

对于线性磁路及漏磁通不随气隙变化的电磁系统,由式(2.2-79)可导出计算吸力的实用公式

$$F = -\frac{1}{2} U_\delta^2 \frac{dG_\delta}{d\delta} \quad (\text{N}) \quad (2.2-80)$$

式中: $\frac{dG_\delta}{d\delta}$ 表示气隙磁导对气隙的导数。

式(2.2-80)是在假设磁路为线性的情况下得出的,但也适用于非线性磁路的计算,由于当 δ 增加时 G_δ 减小,所以 $\frac{dG_\delta}{d\delta}$ 为负值,因此实际吸力 F 是正值。

5.2.1.2 麦克斯韦公式

根据麦克斯韦公式,并假设磁极间磁场是均匀分布的,可得出计算吸力的简化公式

$$F = \frac{B_{\delta}^2 S}{2\mu_0} = \frac{\Phi_{\delta}^2}{2\mu_0 S} \quad (\text{N}) \quad (2.2-81)$$

式中: B_{δ} 为工作气隙的磁通密度, T; S 为磁极面积, m^2 。

5.2.2 不同电磁系统的吸力特性

合理的电磁系统结构型式应能使其静态吸力特性与反力特性得到良好的配合,不同型式的电磁系统具有不同的吸力特性。

直流电磁系统常用的结构型式有盘式、拍合式和螺管式等,其吸力特性曲线如图 2.2-37 所示。

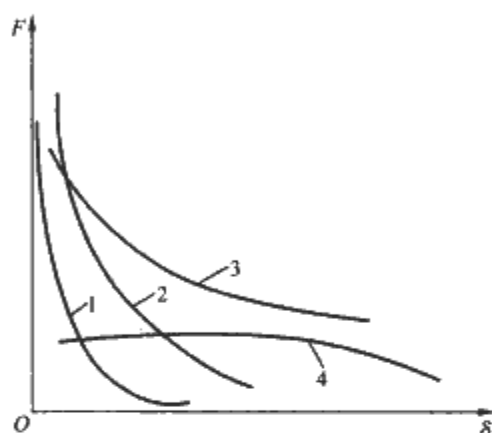


图 2.2-37 直流电磁系统的吸力特性

1—盘式; 2—拍合式;

3—有挡铁螺管式; 4—无挡铁螺管式

由于盘式电磁系统的磁极面积很大,磁路很短,在气隙小时能获得非常大的吸力,它有两个串联的工作气隙,因而随着气隙的增大,吸力下降很快,所以吸力特性非常陡峭。拍合式电磁系统有一个工作气隙和一个棱角气隙,因而随工作气隙的增大,吸力下降很快,但比盘式要慢一些,因此吸力特性比较陡峭。螺管式电磁铁除磁极端面的吸力外,还有漏磁产生的螺管力作用在衔铁上,对于无挡铁螺管式,磁极端面的吸力较小,由于气隙增大时漏磁产生的螺管力变化不大,吸力特性比较平坦。对有挡铁的螺管式,磁极端面的吸力较大,在小气隙部分的吸力特性接近拍合式。对于同一类型的电磁系统,采取不同的磁极形状,也可获得不同的吸力特性。

交流电磁系统的结构型式小容量采用直动式,大容量采用转动式。直动式电磁系统的结构有:单 E 型、双 E 型、单 U 型、双 U 型、T 型、螺管式。

假设:①电磁系统的材料相同,导磁体的截面也相同,即 E 型中柱铁心截面与 U 型相同,两边柱铁心截面为中柱铁心的一半,螺管式铁心柱截面与 U 型相同;②线圈电压、电阻及匝数均相同;③铁心柱间距离相同,线圈窗口面积相

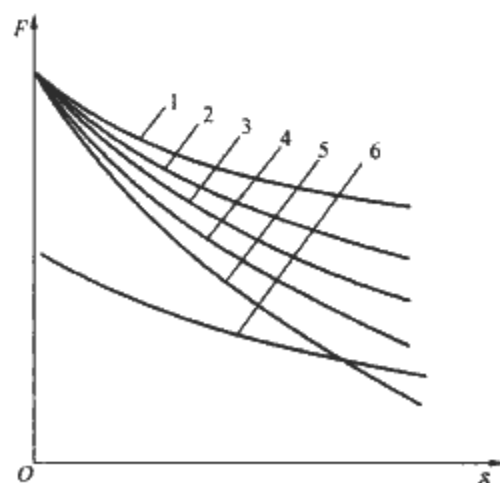


图 2.2-38 不同交流电磁系统结构的吸力特性

1—双 E 型; 2—双 U 型; 3—T 型;

4—单 U 型; 5—单 E 型; 6—螺管式

同。几种结构的吸力特性如图 2.2-38 所示。

双 U 型电磁系统气隙增大时,气隙磁通减小较少,又有螺管力,所以吸力特性比较平坦。双 E 型电磁系统漏磁比 U 型多,因此主磁通比 U 型的少,而且差别在气隙越大时越明显,所以吸力特性比 U 型陡峭。单 E 型和单 U 型的漏磁通较多,且没有螺管力,因此吸力特性比双 E 型和双 U 型陡峭。T 型电磁系统的工作气隙磁导大于双 E 型、小于单 U 型,所以吸力大于双 E 型小于单 U 型,这种差别气隙越大越明显,因此吸力特性介于两者之间。螺管式电磁系统气隙增大时主磁通减少小,且有螺管力的作用,因此吸力平坦,衔铁处于闭合位置时只有一个工作气隙,吸力约为其他型式的一半。

5.2.3 交流电磁系统吸力特性及分磁环原理

交流电磁系统的励磁绕组的电源电压为正弦交变量,因此其中的磁通也为正弦交变量。则按照麦克斯韦电磁力计算公式,电磁力可分为恒定部分和交变部分如式 (2.2-82),恒定部分为平均吸力,交变部分以 2 倍电源频率随时间周期性变化。由于磁通的正弦交变性,使交流电磁系统的吸力具有脉动性,吸力在 0 到两倍的平均吸力之间按 2 倍的电源频率周期性变化。

$$F = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S} = \frac{\Phi_m^2}{2\mu_0 S} \sin^2 \omega t = \frac{\Phi_m^2}{4\mu_0 S} - \frac{\Phi_m^2}{4\mu_0 S} \cos 2\omega t \quad (2.2-82)$$

由于交流电磁系统吸力的脉动性,使得吸力在半个周期内与反作用力 F_r 线相交两次,当吸力由最大值减小到小于反作用力以后衔铁将被释放,但吸力又很快回升到大于反作用力,又使得衔铁重新吸合,这样使得衔铁产生振动。为了消除振动,通常采用在交流电磁铁磁极面上安装分磁环,将磁极端面处的磁通分成两个彼此有一定相位差的分量,使得两磁通产生的合成吸力的最小值不低于反作用力就能完全消除有害的振动。

由于磁导体中的铁损会使磁路中出现磁抗,在磁极端面的一部分套上一个导体环,则被导体环所包围的磁路部分就有一个磁抗。磁抗的存在使得通过无磁抗支路的磁通 Φ_1 与经过有磁抗支路的磁通 Φ_2 之间出现了相位差。在这个基础上,再适当调整一下两个支路的磁通值,便能达到消除上述有害振动的目的。磁极面结构、等效磁路和相量图如图 2.2-39 所示。加装分磁环后的电磁吸力如图 2.2-40 所示。

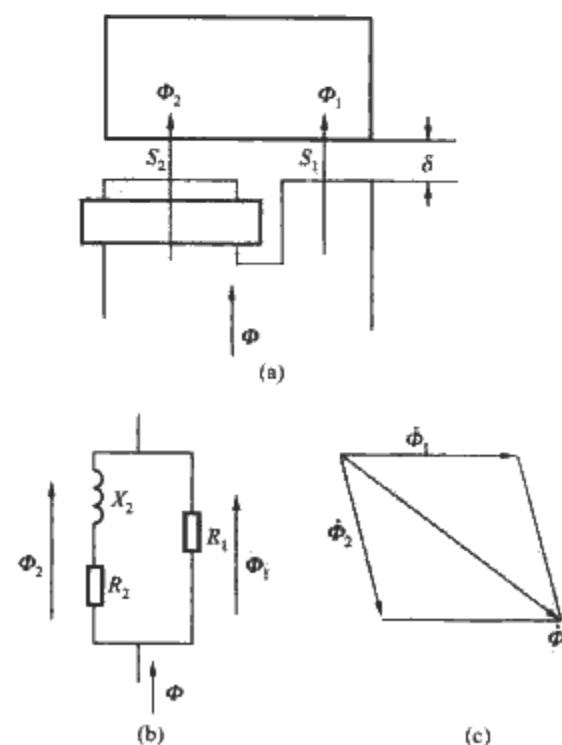


图 2.2-39 磁极面结构和等值磁路及相量图

(a) 磁极面结构; (b) 等效磁路; (c) 相量图

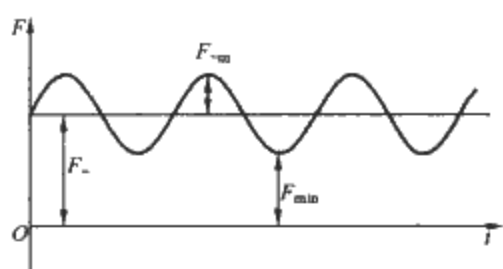


图 2.2-40 加装分磁环后的电磁吸力

5.3 电磁系统动态特性的分析计算

在设计电磁电器时,传统方法是按照电磁系统的静态吸力特性来判断其工作特性,要求在衔铁全部行程范围内,静态吸力特性大于反力特性。可是,实际上电器的接通过程并不是决定于静态特性而是动态特性,也即随时间而变化的工作过程。

动特性通常包括电磁铁线圈中的电流 i 、电磁吸力 F 、线圈磁链 Ψ 、运动部分的位移 x 及其速度 $\frac{dx}{dt}$ 、加速度 $\frac{d^2x}{dt^2}$ 随时间而变化的关系。静态吸力特性由电磁铁线圈中电流的稳态值所决定,而在磁系统衔铁运动过程中,电流值不同于稳态值。因此在同一衔铁位置时动态吸力不同于静态吸力。因此要设计具有高的机械寿命和电气寿命,并且动作可靠的电器,必须研究其动态过程。只有计算动态过程,才可能合理地确定电磁铁结构参数间的关系,以保证工作的可靠性和一定的使用寿命。

5.3.1 直流电磁系统的动态特性

电磁机构的动态特性由用来表示电路、运动和吸力的一系列微分方程描述。

电磁机构吸合的动态过程包括触动阶段和吸合运动阶段,触动阶段衔铁尚未运动,只需从电磁方面来分析。对于直流电磁系统,电压平衡方程如式(2.2-83)所示。

$$u = iR + L \frac{di}{dt} \quad (2.2-83)$$

式中: L 为励磁绕组的电感。

电磁系统吸合过程的阶段,由于电磁吸力已大于反作用力,故衔铁开始运动。已有运动速度,在线圈中就会产生阻碍电流增大的运动反电动势。最初,速度尚小,运动反电动势在总的反电动势中尚未占主要地位,所以线圈电流继续增大。随着 v 之不断增大,运动反电动势也不断增大。一旦它增至一定的数值,电流便开始减小,以维持电压的平衡。至于电流减小的速率和幅度则为具体参数所决定。当衔铁运动完毕到吸合位置后,运动反电动势等于零,而线圈电流又新的基础上重新增大。因此,整个吸合运动阶段可以用下面的微分方程组来表示

$$\begin{cases} \frac{d\Psi}{dt} = U - iR \\ m \frac{dv}{dt} = F - F_f \\ \frac{dx}{dt} = v \end{cases} \quad (2.2-84)$$

式中: m 为衔铁的质量; v 为衔铁的运动速度; x 为衔铁所走的行程; F 为电磁吸力,它是电流 i 和行程 x 的函数; F_f 为反作用力,它是行程 x 的函数 $F_f = f(x)$ 。

衔铁运动过程结束后,机械运动过程虽已结束,但电磁过渡过程仍在继续,线圈电流和磁通仍在增大,直到它们分别达到各自的稳态值为止。

5.3.2 交流电磁系统的动态特性

和直流电磁系统一样,交流电磁系统在其励磁绕组接通

电源或自电源断开后,也将经历一个过渡过程。但交流电磁系统的励磁电压或电流是交变参量,因此,它的过渡过程与直流时大不一样。此外,电源电压合闸相角对于过渡过程也有很大的影响。因此,交流电磁系统动态过程的分析计算较直流系统复杂很多。

和直流电磁系统一样,交流电磁系统的动态过程也可分为触动阶段和吸合运动阶段。触动阶段是从电源励磁绕组接通电源开始一直到作用在衔铁上的电磁吸力等于释放位置上的反作用力为止,此时动铁心一直处于释放位置上,磁路基本上是线性的,可以用式(2.2-85)所示的微分方程表示

$$\frac{d\Psi}{dt} = U_m \sin(\omega t + \varphi) - iR \quad (2.2-85)$$

式中: $\frac{d\Psi}{dt}$ 指磁链 Ψ 对时间 t 的变化率,即线圈反电动势; U_m 为电源电压峰值; φ 为合闸相角; ω 为角频率; i 和 R 为线圈的电流和电阻。

吸合阶段从衔铁开始动作一直到衔铁运动到最小工作气隙为止。交流电磁系统的动态特性的计算比直流电磁系统复杂很多,主要是由于在这个阶段中,磁导体不仅有磁滞损耗和涡流损耗,而且大都设有分磁环,还有如合闸相角等很多其他因素也会影响对运动过程产生影响。因此,在求解这个阶段时,必须采取一些相应的措施,而不能直接运用传统的计算方法来求解。吸合阶段的运动可以用式(2.2-86)所示的方程来表示

$$\begin{cases} \frac{d\Psi}{dt} = U_m \sin(\omega t + \varphi) - iR \\ m \frac{dv}{dt} = F - F_f \\ \frac{dx}{dt} = v \end{cases} \quad (2.2-86)$$

式中: m 为衔铁的质量; v 为衔铁运动的速度; x 为衔铁的行程; F 为动态电磁吸力; F_f 为反作用力。

5.4 电磁铁的工程设计方法

电磁铁的设计是在满足规定的工作特性要求下,确定电磁铁的结构参数,如磁系统的几何尺寸、线圈尺寸、匝数和线径等。电磁铁的基本特性有电磁特性和发热特性,电磁特性主要是电磁铁的吸力特性,发热特性是指电磁铁各部分的发热温升。

电磁铁的设计步骤为:

- (1) 根据负载的反力特性选择电磁铁的结构形式。
- (2) 初步设计确定电磁铁的结构参数。
- (3) 按确定的尺寸和数据,验算线圈温升,计算电磁铁静态吸力特性及其他特性,评价电磁铁的经济技术指标。

5.4.1 电磁铁结构形式的选择

5.4.1.1 按特性配合选择电磁铁的结构形式

电磁铁的任务是带动负载做机械功,因此电磁铁的结构形式选择应从反力特性出发,合理的结构形式应该能使电磁铁的静态吸力特性和反力特性得到良好的配合。常遇到的负载的反力特性如图 2.2-41 所示。

根据图 2.2-41 所示的反力特性和 5.2.2 节所示的不同电磁系统的吸力特性选择合适的电磁铁结构来配合给定的负载特性。

5.4.1.2 按结构因素选择电磁铁结构型式

设计电磁铁的原始数据之一是设计点的工作气隙 δ_0 和吸力 F_0 ,为了能从这个设计点来选择电磁铁的结构型式,引入比值系数 $K_j = \sqrt{F_0}/\delta_0$ 。因为在一定条件下,吸力 F_0

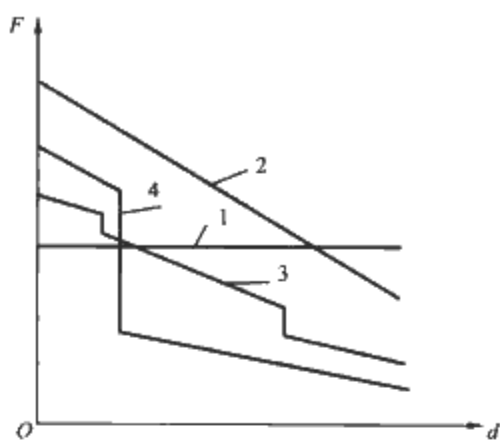


图 2.2-41 负载的反力特性种类
1—不随衔铁行程改变的常值负载；
2—反力随行程增加的负载；3—继电器反力特性；4—接触器的反力特性

与铁心直径 d_t 的二次方成正比，而衔铁行程 δ_0 与铁心长度 l_t 成正比，因而比值系数可写成

$$K_j = \frac{\sqrt{F_0}}{\delta_0} \propto \frac{d_t}{l_t}$$

系数 K_j 实际上表示了电磁铁的尺寸比例，故称为结构系数，它是选择电磁铁最佳结构型式的根据。为了评价电磁铁的结构型式，采用经济重量指标 m 来衡量

$$m = \frac{\text{电磁铁重量}}{\text{拟定功}} \quad (2.2-87)$$

式 (2.2-87) 中，所谓拟定功是指吸力特性上任一点的工作气隙 δ 与吸力 F 的乘积。

一个电磁系统的经济重量指标 m 最小，即表示它所获得的拟定功最大，而电磁铁的重量最轻。根据大量计算和实践经验表明：不同类型的电磁铁的经济重量最小值发生在结构系数 K_j 的不同范围内。利用这一点，当已知 K_j 时，选择在此值范围内所对应的电磁铁型式，是比较适宜的型式。用结构因数来选择电磁铁的结构型式，一般仅适宜用于直流电磁铁。各种类型直流电磁铁适用的结构系数范围见表 2.2-18。

表 2.2-18 直流电磁铁结构系数适用范围

电磁铁类型	K_j 的适用范围 ($N^{0.5}/cm$)
无挡铁螺管式	280 以上
具有圆锥磁极 (顶角 $\alpha=60^\circ$) 的螺管式	5.5~12.5
具有圆锥磁极 (顶角 $\alpha=45^\circ$) 的螺管式	12.5~52
平面磁极螺管式	50~280
U 型拍合式	8.4~84

5.4.2 直流电磁铁的设计

初步设计计算中的选型与计算，通常是以反力特性为原始依据，根据反力特性画出应有的吸力特性，在还没有求得吸力特性之前，初步设计需要选择一个设计点，保证在该点的吸力可以克服反力动作。一般选取最大气隙点 δ_0 、吸力 F_0 作为设计点。在设计点处有一相应的结构指数 K_j ，这个指数即可作为选择电磁铁型式的一个依据。

电磁铁的初步设计是根据一些基本关系式来确定电磁铁的尺寸和线圈数据。基本关系式主要有：

5.4.2.1 吸力与铁心尺寸的关系式

电磁铁的表面吸力近似用麦克斯韦公式，不装极靴时

$$F = \frac{B_\delta^2 A_c}{2\mu_0} \quad (2.2-88)$$

式中： F 为电磁铁磁极表面吸力，N； A_c 为铁心截面面积，

m^2 ； B_δ 为工作气隙磁通密度，T； μ_0 为真空磁导率，H/m。

装极靴时

$$F = \frac{B_\delta^2 A_p}{2\mu_0} \quad (2.2-89)$$

式中： A_p 为极靴面积。

对于磁系统具有两个相同的工作气隙时，吸力计算公式中需要乘以 2。对于具有螺管力的螺管电磁铁，除了磁极表面的吸力外还存在螺管力，此时吸力表示为

$$F = \frac{B_\delta^2 A_c}{2\mu_0} (1 + k_l) \quad (2.2-90)$$

式中： k_l 为螺管力系数，短行程 $k_l = 0$ ，长行程 $k_l = 0.3 \sim 0.6$ 。

根据吸力的计算公式，为了计算铁心的尺寸，还要选定工作气隙磁通密度值 B_δ ， B_δ 一般在 $0.1 \sim 1T$ 的范围内变动，可以根据 K_j 选择 B_δ 。

5.4.2.2 磁通势方程式

电磁铁的线圈磁通势 IN 等于磁路各部分磁压降之和，当工作气隙为 δ_0 时磁通势方程为

$$IN = \frac{B_\delta \delta_0}{\mu_0} + \sum (IN)_c + \sum (IN)_{lg} \quad (2.2-91)$$

式中： $\frac{B_\delta \delta_0}{\mu_0}$ 为工作气隙中磁压降； $\sum (IN)_c$ 为导磁体部分磁压降的总和； $\sum (IN)_{lg}$ 为非工作气隙磁压降的总和。

初步设计时，电磁铁结构尺寸未定，所以导磁体和非工作气隙的磁压降无法确定。根据经验，在打开位置一般取这两部分磁压降为气隙磁压降的 $0.2 \sim 0.55$ 倍，因此： $IN = (1.2 \sim 1.5) \frac{B_\delta \delta_0}{\mu_0}$ ，系数与 B_δ 大小有关， B_δ 大时取大值， B_δ 小时取小值。

5.4.2.3 线圈发热方程式

长期工作制时，电磁铁线圈温升可用牛顿公式计算

$$\tau = \frac{I^2 R}{K_T A} \quad (2.2-92)$$

式中： τ 为线圈温升； I 为线圈电流； R 为线圈电阻； A 为线圈散热面积； K_T 为线圈综合散热系数。

线圈电阻

$$R = \frac{\pi \rho (c + r_c) N^2}{k_{lc} h \Delta} \quad (2.2-93)$$

式中： ρ 为导体的电阻率； c 为线圈外半径； r_c 为线圈内半径； k_{lc} 为线圈填充系数； h 为线圈高度； Δ 为线圈厚度。

取线圈厚度比值系数 $\beta = \frac{h}{\Delta}$ 和 $n = \frac{\Delta}{2r_c}$ ，则线圈高度为

$$h = \sqrt{\frac{\rho (n+1) (IN)^2}{2k_{lc} K_T \tau (1+2n+k_\beta) m r_c}} \quad (2.2-94)$$

式中： k_β 为线圈内表面与外表面散热率之比，按经验数据选取。

对于短时工作制和反复短时工作制，根据等效发热原理和工作通电时间引入系数进行计算。

(1) 线圈的比值系数 β 根据如下的经验数据选择：

1) 对于拍合式电磁铁，大尺寸 $\beta = 4 \sim 5$ ，小尺寸 $\beta = 6 \sim 7$ 。

2) 对于螺管式电磁铁，长行程 $\beta = 6 \sim 8$ ，短行程 $\beta = 3 \sim 5$ 。

(2) 线圈的比值系数 n 根据如下的经验数据选择：

1) 对于小尺寸电磁铁，大尺寸 $n = 0.5 \sim 0.8$ 。

2) 对于大尺寸电磁铁，大尺寸 $n = 0.25 \sim 0.5$ 。

5.4.2.4 电路方程式

直流电压线圈的电路方程式为

$$U = IR = \frac{4\rho(c+r_c)}{d^2} IN \quad (2.2-95)$$

式中: U 为线圈外施电压; d 为线圈导线线径; ρ 为导线电阻率; c 和 r_c 分别为线圈的外半径和内半径。

线圈导线直径

$$d = \sqrt{\frac{4\rho(c+r_c)}{U} IN} \quad (2.2-96)$$

为保证电磁铁可靠工作, 线圈电压取 $0.85U_N$, 电阻率 ρ 取允许发热温度的热态值。

线圈匝数为

$$N = \frac{4k_{tc}h\Delta}{\pi d^2} \quad (2.2-97)$$

对于电流线圈, 线圈电流为 I_N , 匝数为 $N = IN/I_N$,

线圈导线线径为 $d = \sqrt{\frac{4k_{tc}h\Delta}{\pi N}}$ 。

根据上述的初步设计计算, 确定电磁铁的尺寸和线圈参数, 再进行反复的特性验算和修正, 直到满足设计要求。

5.4.3 交流电磁铁的设计

交流电磁铁的设计原理和步骤与直流电磁铁大致相同, 设计的目的也是求出它的尺寸及线圈参数, 并加以特性验算。初步设计也是根据反力特性选择一个计算点和初始力, 根据初始力和行程来确定铁心截面等结构尺寸和线圈参数。

初步设计的基本关系式有:

5.4.3.1 吸力方程式

一个工作气隙的电磁铁, 用麦克斯韦公式计算一个周期电磁吸力的平均值为

$$F = \frac{B_8^2 A_c}{4\mu_0} \quad (2.2-98)$$

式中: B_8 为工作气隙交变磁通密度的幅值; A_c 为铁心截面积。

$$B_8 = 0.85 \frac{B_c}{\sigma} k_N \quad (2.2-99)$$

式中: B_c 为衔铁在闭合位置, 线圈加额定电压 U_N 时铁心磁通密度; σ 为漏磁系数 (衔铁打开位置铁心磁通与气隙磁通的比值); k_N 为衔铁打开位置线圈反电动势与电源额定电压的比值, 一般取 $0.75 \sim 0.96$ 。

铁心截面积

$$A_c = \frac{4\mu_0 F_0}{B_8^2} \quad (2.2-100)$$

5.4.3.2 电路方程式

初步设计时线圈匝数为

$$N = \frac{(0.97 \sim 0.99)U}{4.44fB_c A_c} \quad (2.2-101)$$

式中: N 为线圈匝数; U 为线圈电源电压; f 为电源频率; B_c 为铁心磁通密度幅值; A_c 为铁心截面积。

5.4.3.3 衔铁吸合位置时磁通势方程式

衔铁吸合位置时线圈总磁通势为

$$IN = (1.65 \sim 2.5) \frac{\Phi_c}{\sqrt{2}\Sigma\Delta} \quad (2.2-102)$$

式中: Φ_c 为铁心磁通的幅值; $\Sigma\Delta$ 为工作气隙与去磁间隙的总磁导。

5.4.3.4 线圈发热方程式

交流电磁铁的线圈发热和直流电磁铁不一样, 不仅线圈电阻产生损耗而且铁心也产生损耗而发热, 线圈温升可由下式计算

$$\tau = \frac{I^2 R + p_{ch}}{K_T A} \quad (2.2-103)$$

式中: $I^2 R$ 为线圈电阻损耗; p_{ch} 为线圈包围部分的铁心损耗。

线圈散热面积为

$$A = (2a + 2b + 2\pi\Delta)h = (2 + 2\epsilon + 2\pi n)ah \quad (2.2-104)$$

式中: a 和 b 为铁心截面的宽度和厚度; $\epsilon = a/b$; $n = \Delta/a$ 指线圈厚度与铁心边长的比值系数; h 为线圈高度。

线圈平均匝长为

$$l_{pj} = 2a + 2b + \pi\Delta = (2 + 2\epsilon + 2\pi n)a \quad (2.2-105)$$

线圈电阻损耗为

$$I^2 R = \frac{\gamma(2 + 2\epsilon + \pi n)}{k_{tc} h n} (IN)^2 \quad (2.2-106)$$

线圈包围部分铁心损耗为

$$p_{ch} = p_c V \gamma_c = k_c h \quad (2.2-107)$$

式中: p_c 为单位重量铁心损耗; V 为线圈包围部分铁心体积; γ_c 为铁的密度。

$$k_c = p_c \epsilon a^2 \gamma_c$$

因此线圈高度为

$$h = \sqrt{\frac{\gamma(2 + 2\epsilon + \pi n) (IN)^2}{[K_T \tau(2 + 2\epsilon + 2\pi n)a - k_c] k_{tc} n}} \quad (2.2-108)$$

初步设计时一般选: $n = 0.5 \sim 0.8$; $\beta = 2 \sim 4$ 。

线圈线径为

$$d = \sqrt{\frac{4k_{tc}h\Delta}{\pi N}} \quad (2.2-109)$$

5.4.3.5 分磁环的设计

为了防止交流电磁铁的振动, 在铁心磁极端面装置分磁环, 设分磁环包围的磁极面积为 A_2 , 不包围面积为 A_1 , $\gamma_1 = \frac{A_1}{A_1 + A_2}$, $\gamma_2 = \frac{A_2}{A_1 + A_2}$, 则设计分磁环时一般取 $\gamma_2 = 0.7 \sim 0.85$, 则分磁环电阻

$$R_d = (0.2 \sim 0.4) \frac{\omega \mu_0 (A_1 + A_2)}{\delta_p} \quad (2.2-110)$$

式中: ω 为电源角频率; δ_p 为衔铁闭合时工作气隙长度; μ_0 为真空中磁导率。

分磁环的截面积为

$$A_d = \frac{\rho_d}{R_d} \quad (2.2-111)$$

式中: ρ 为分磁环热态电阻率; l_d 为分磁环平均匝长; A_d 为分磁环截面积。

根据以上的初步设计关系式可以确定交流电磁铁的尺寸、线圈参数和分磁环尺寸, 然后进行反复的特性验算和修正, 直到满足设计要求。

第3章 低压开关电器的开断过程与开关电弧

由于低压断路器的开断过程在低压开关电器中最为典型，所以本章以低压断路器的开断过程和开关电弧作为分析对象进行叙述，但书中内容作为低压电器开关电弧的理论基础也同样适用于其他低压电器，如交流接触器等。

1 低压断路器的分断性能与开断过程分析

1.1 低压断路器的分断性能

低压断路器是用于低压电网的配电电器，它能接通、承载及分断正常工作电流，也能分断过电流及短路故障电流。它能起多种保护功能，如过载、短路、欠电压、单相接地和漏电等。低压断路器按其结构可分为三大类：万能式断路器、塑壳断路器和小型断路器。国际电工委员会的 IEC 标准和我国国家标准按使用类别把断路器分成 A 类和 B 类两种类型：其中 A 类断路器在短路情况下，无明确指明具有选择性保护功能；而 B 类断路器则明确指明具有选择性保护功能。图 2.3-1 表示两类断路器安装位置及其保护特性配合，其中断路器 QF1 作为主回路馈电侧断路器，其保护特性具有作为线路过载保护的长延时，短路情况下的短延时和瞬时三段保护，而断路器 QF2 作为负载侧的支路开关，仅具有长延时和短路情况瞬时动作的二段保护。当负载侧支路 1 短路时，若短路电流为 I_1 ，从图 2.3-1 (b) 的保护特性配合来看，短路电流使断路器 QF2 首先动作，而断路器 QF1 由于具有短延时特性延缓动作，因而由断路器 QF2 开断短路故障，而作为主开关的断路器 QF1 不动作，这就保证了其他支路的正常运作，实现了选择性保护，即仅有产生短路故障的支路开断。目前，大量的塑壳断路器、小型断路器和一部分小电流规格的万能式断路器属于 A 类，而绝大多数万能式断路器和大规格塑壳断路器属于 B 类。

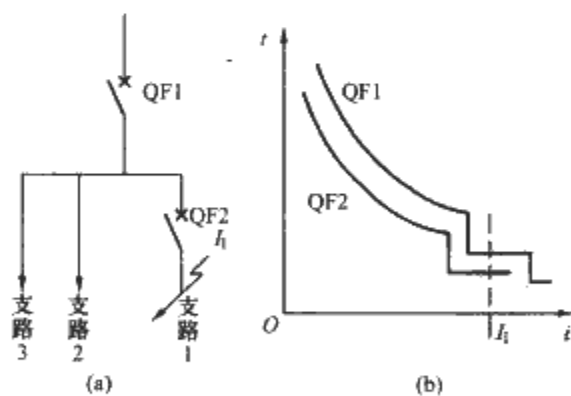


图 2.3-1 选择性保护的配合
(a) 两种断路器的安装位置；(b) 保护特性配合

断路器的短路分断能力分极限分断 I_{cu} 和运行分断能力 I_{cs} 两种：

(1) 极限分断能力 I_{cu} 是在规定试验条件下，按 O—t—CO 的试验程序分断的短路电流，用预期电流的有效值表示，其中 O 表示分断，t 表示停歇时间，一般为 3min，CO 表示接通后即分断。

(2) 运行短路分断能力 I_{cs} 是在规定试验条件下，按 O—t—CO—t—CO 的试验程序分断的短路电流。

由于运行短路分断能力试验后，还要求被试断路器能继续承载额定电流，试验后还必须进行温升试验和 5% 的电器寿命试验，因而它比极限分断能力的试验更为严酷，一般断路器的 I_{cs} 较 I_{cu} 值要低。

为了提高开断性能和缩小体积，降低短路电流对电网中其他电气设备的电动力与热效应，A 类断路器常具有有限流性能，利用快速增长的电弧电压来限制短路电流，一般用限流系数来表示断路器的限流能力，限流系数是开断时的最大通过电流峰值 (kA) 与预期的短路电流的周期分量有效值 (kA) 之比。对于限流断路器，限流系数越小，表示该断路器的限流性能越好。断路器的限流能力也可用特性曲线来表示，纵坐标为最大通过的电流峰值，横坐标为预期短路电流有效值，它表示在开断短路电流时，实际分断的电流峰值与发生的预期短路电流有效值的关系。

塑壳断路器一般采用电动斥力原理来达到限流目的，如图 2.3-2 (a) 所示的结构，当短路电流通过 U 形静触头回路和动触头导电杆时，由平行导体产生的电动斥力 F_L 及触头接触点处由于电流线的收缩产生的霍姆 (Holm) 力 F_H ，使动触头快速打开，产生电弧电压而限流。另一种结构为用一与主回路串联的冲击电磁铁 [见图 2.3-2 (b)]，当短路电流通过电磁铁线圈时，动铁心作为一种快速打击器直接顶开动触头。

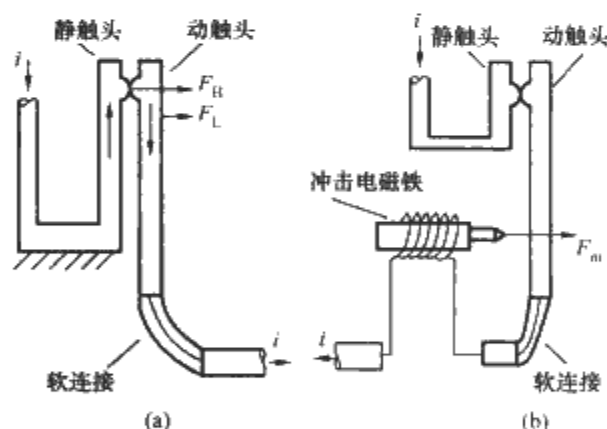


图 2.3-2 限流开断的两种结构
(a) 电动斥力；(b) 冲击电磁铁

低压断路器的灭弧系统一般都采用栅片短弧原理，依靠触头导电回路产生的磁场驱使电弧进入灭弧室。近年来，气吹灭弧在低压断路器中也得到应用，放置产气绝缘材料于灭弧室器壁，在电弧高温下产生含氢的气体，一方面有利于冷却电弧，另一方面依靠气流驱使电弧进入栅片。

低压断路器分成、万能式断路器、塑壳断路器和小型断路器，它们结构上有所不同，工作性能和应用场合也不同。其中小型断路器和大部分塑壳断路器都具有有限流开断性能。

万能式断路器或称 ACB (Air Circuit Breaker)，一般属于 B 类断路器，图 2.3-3 为万能式断路器的结构图，断路器的前部为操动机构、脱扣器和控制面板，后部为触头灭弧系统，整个结构安装于一个框架上。万能式断路器一般采用数字脱扣器，又称智能脱扣器，由于基于单片微处理器，因而可实现三段保护等多种保护功能，并可与上级配电系统双向

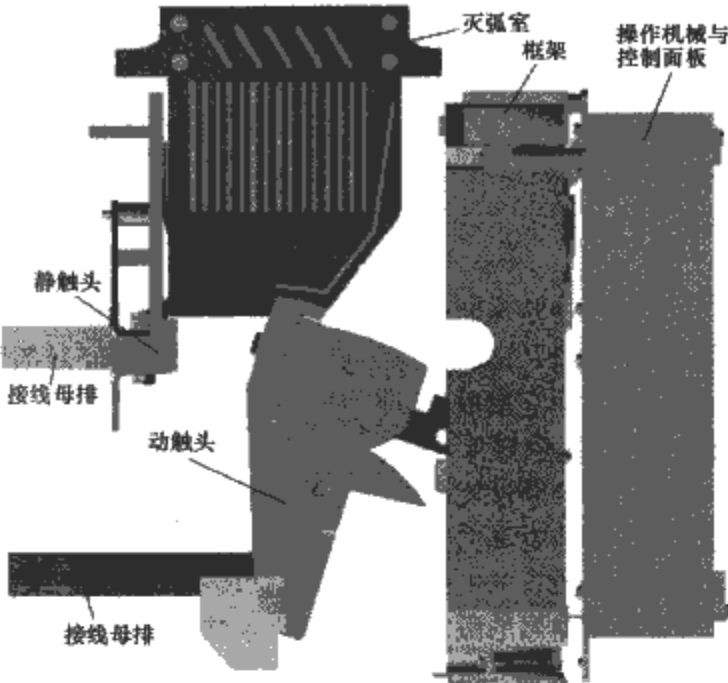


图 2.3-3 万能式断路器的结构

通信。

塑壳断路器或称 MCCB (Molded-case Circuit Breaker)，一般属于 A 类断路器，利用上述图 2.3-2 (a) 的电动斥力结构起短路电流限流作用，这样可在小尺寸条件下获得大的开断能力，这种断路器一般作为低压配电系统的分支开关，它的所有部件，包括机构、触头和灭弧系统以及脱扣器都装在一个塑料外壳上，既起支撑体作用，又起绝缘作用，它的额定电流在几十安至千余安之间。图 2.3-4 为塑壳断路器的结构，图中左侧为触头和灭弧系统，上部为机构，右侧为脱扣器，塑壳顶部为操作手柄。塑壳断路器的脱扣器有两种结构，一种为热—磁脱扣器，另一种为智能脱扣器。热—磁脱扣器中热双金属起过载保护作用，磁脱扣器作短路瞬时保护，智能脱扣器采用数字电路实现保护功能多样化，并可与上级配电系统双向通信。

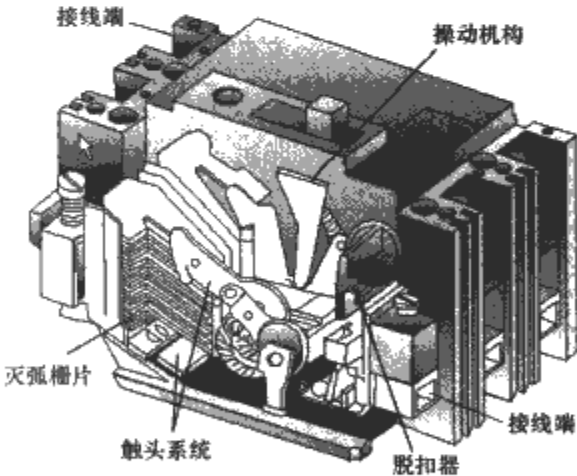


图 2.3-4 塑壳断路器的结构

小型断路器或称微型断路器 MCB (Miniature Circuit Breaker)，一般用于家用或类似场合的电气线路和设备的过载和短路保护，额定电流较小，一般为 125A 以下，额定电压为民用等级，限于 220/380V，它也可在工业上作电缆和电动机保护。小型断路器也是一种塑料外壳断路器，它采用图 2.3-2 (b) 的冲击电磁铁结构来达到限流作用，但通常做成单极，它可由几个单极断路器拼装成多极的，以适应三相电路使用。小型断路器的脱扣器采用热—磁式。

图 2.3-5 为一种小型断路器的结构，当短路电流通过螺管式冲击电磁铁的线圈时，其动铁心一方面直接顶开动触头，另一端推动脱扣钩使机构脱扣。

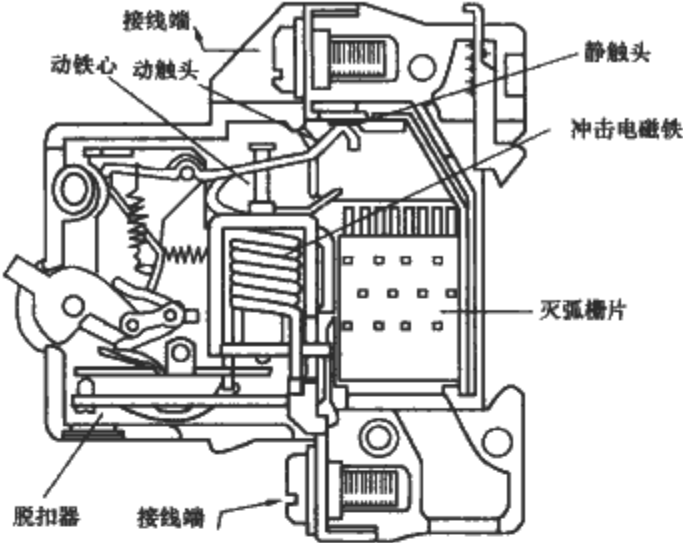


图 2.3-5 一种小型断路器的结构

B 类断路器开断过程决定于电流自然过零后，弧隙是否被重击穿而继续燃弧，这一过程已在第 2 章中叙述，因而这里重点讨论以塑壳断路器为代表的断路器的限流开断过程。

1.2 塑壳限流断路器的开断过程

塑壳断路器采用栅片灭弧，图 2.3-6 为采用这种灭弧室的开断过程，一般可分四个阶段来分析。

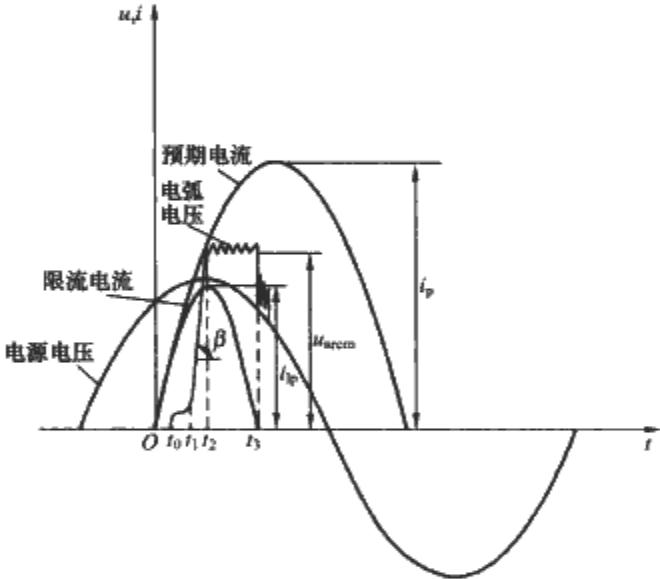


图 2.3-6 灭弧室的开断过程

- (1) 从短路电流出现瞬间 $t=0$ 到触头始动时刻 t_0 ，这段时间为限流机构的动作时间。对塑壳断路器来说，是指动触头上的电动斥力随短路电流增长，至电动斥力等于触头压力，而使触头开始斥开所需时间。这段时间内触头尚未分开，因而触头两端电弧电压 $U_{arc}=0$ 。
 - (2) $t_0 \sim t_1$ 段时间。动触头在 t_0 时刻开始打开，触头上出现电弧，由于电弧停滞现象，电弧在触头上保持不动，这段时间称为电弧停滞时间 $t_1=t_1-t_0$ ，它决定于触头材料、吹弧磁场与触头打开速度等因素。这一阶段中电弧电压变化不大。
 - (3) 到 t_1 瞬间，电弧拉长到一定长度，这时电弧在自励磁场产生的电动力作用下，离开触头并通过弧角进入灭弧栅片，这一阶段电弧电压很快地增长，其增长速度 β 决定了电弧运动速度和进入灭弧栅片的时间 t_2 。 t_2-t_1 这段时间为电弧运动时间。
 - (4) 当电弧进入灭弧栅片后，电弧电压达到其最大峰值 U_{arcm} ，此时电弧电压已大于电源电压瞬时值，电流被强制减小，到 t_3 瞬间电流降低到零，电弧熄灭。
- 若用限流断路器分断一负载为 $R、L$ 的单相回路，则可

用下述微分方程来描述电流、电压关系

$$U_m \sin(\omega t + \varphi) = L \frac{di}{dt} + Ri + U_{arc} \quad (2.3-1)$$

式中： U_m 为电源电压幅值； φ 为短路合闸相角。
将式 (2.3-1) 改写为下述形式

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} [U_m \sin(\omega t + \varphi) - Ri - U_{arc}] \quad (2.3-2)$$

电流在 t_3 瞬间达到峰值 i_{lp} ， $di/dt=0$ ，电弧电压等于 $U_m \sin(\omega t + \varphi) - Ri$ ，随之电弧电压继续上升，并一直大于电源电压，此时 di/dt 为负，电流逐渐减小直至为零。图 2.3-6 中的预期短路电流波形，其幅值为 i_p 。很明显，由于限流作用的存在，实际分断电流的幅值 i_{lp} 较 i_p 要小得多，燃弧时间也缩短了，因而允通能量 $\int i^2 dt$ 和电弧能量 $\int u_{arc} i dt$ 都减小了。前者可降低断路器本身和电网中其他设备的短路电流电动力和热效应，后者减小了断路器开断的电弧能量。由图 2.3-6 可见，决定电弧电压的参数有 4 个，它们是限流机构动作时间 t_0 、电弧停滞时间 t_1 、电弧电压上升率 β 和电弧电压幅值 U_{arcm} 。显然，若能减小 t_0 和 t_1 ，增大 β 和 U_{arcm} ，则能增强低压断路器的限流作用。

早在 20 世纪 80 年代中期，ABB 公司的低压电器开发部门对图 2.3-7 所示的 5 种不同的结构方案的限流特性进行了实验对比和计算机模拟，5 种方案实验和仿真结果见图 2.3-8 和图 2.3-9。其中，图 2.3-8 为限流峰值与预期短路电流的关系，图 2.3-9 为允通能量与预期电流的关系。

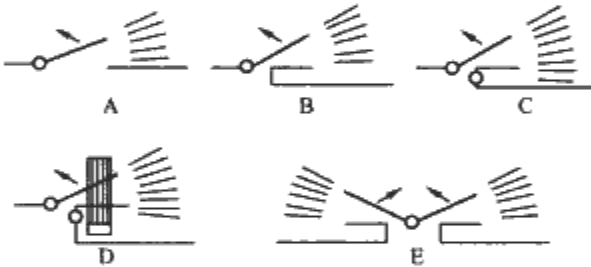


图 2.3-7 5 种不同的限流断路器结构方案

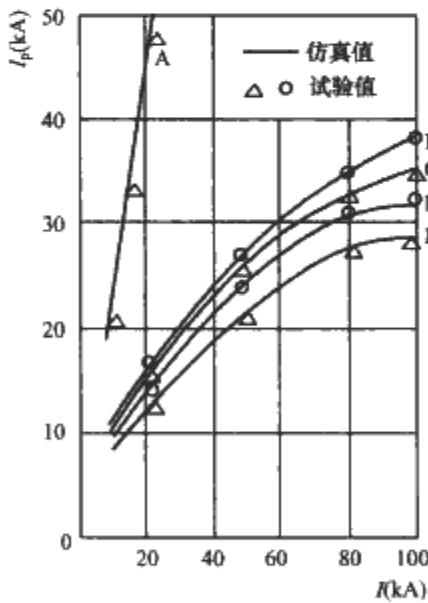


图 2.3-8 限流峰值与预期短路电流的关系

这 5 种方案结构上的区别在于：方案 A 为传统的非限流型结构；方案 B 的静触头做成 U 形导电回路，增强了磁场和作用在动触头上的电动力，这种结构仅动触头能斥开，是动触头一方能绕轴斥开的单面斥开结构；方案 C 与 B 不同之处为静触头也可在电动力作用下斥开，因而是双面斥开结构，这里静触头也可绕轴转动；方案 D 的结构是在 C 方案基础上，在利用电动机槽效应来增强斥开磁场，即用一 U 形磁铁套在静触头导电板上以增强触头区导电回路的自

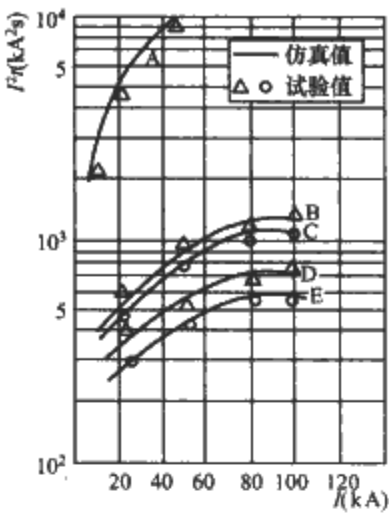


图 2.3-9 为允通能量与预期电流的关系

励磁场，并增强作用在触头臂上的电动力；方案 E 为双断点结构，两个触头串联起来，在电动力作用下同时斥开。从图 2.3-8 和图 2.3-9 可知，方案 C 的限流效果较方案 B 略好，但从结构简单、成本低和工作可靠上看，方案 B 更显示出它的优越性，并且和传统结构 A 相比，方案 B 实际分断的短路电流峰值为后者的 1/10，允通能量为 1/3~1/5。目前采用这种结构的中等限流效应的塑壳断路器已大量生产，额定电流为 125~1250A，分断能力在 380/415V 下可达 70~80kA（有效值）。

方案 E 和 D 都能获得极大的限流效应，但方案 E 较 D 更佳。方案 D 利用增强触头臂的电动力使触头快速斥开以获得很高的电弧电压，而方案 E 则利用两个电弧串联来获得高的电弧电压。方案 E 因采用了双断点触头系统，使得每一灭弧室中所承受的电弧能量和恢复电压降低，因此双断点断路器具有最佳的限流效应，并且适用于额定电压较高的场合。

2 电弧停滞时间

2.1 电弧停滞时间的定义与对电器开断性能的影响

低压开关电器在分断过程中，电弧在触头间呈现到电弧开始运动，需要一定的时间，这段时间称为电弧停滞时间 t_1 。从电弧电压波形来看， t_1 是指从触头分断瞬间 t_0 到电弧电压波形突然上升的时刻 t_1 之间的时间间隔（见图 2.3-10），即 $t_1 = t_1 - t_0$ 。

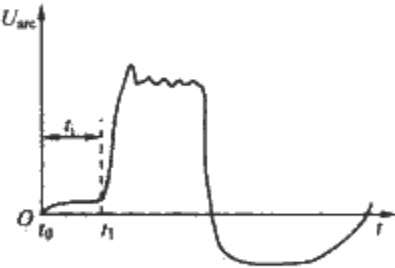


图 2.3-10 电弧停滞时间的定义

电弧停滞时间对低压电器性能有很大影响。首先低压电器触头的电寿命决定于触头的电弧侵蚀，主要是由开断时电弧的高温所造成的，所以，当触头开断时，使电弧斑点迅速移动并离开触头转移到弧角上，即减小电弧停滞时间，将大大有利于提高触头的寿命，这一点对接触器来说尤其重要。电弧停滞时间 t_1 与触头间侵蚀量 M 的关系可由式 (2.3-3) 表示

$$M = kt_1^{0.8} \left(\int_{t_0}^{t_0+t_1} \sqrt{2} I \sin \omega t dt \right)^{1.6} \quad (2.3-3)$$

式中： k 为与材料有关的常数， $k=1.14 \times 10^{-8}$ （银合金）。

若取 $t_0 = 0$ ，则对银合金材料， t_i 与 M 的关系见图 2.3-11，图中计算值是式 (2.3-3) 的计算结果，它与实验结果的变化趋势是一致的。

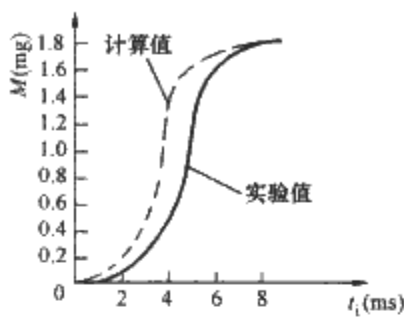


图 2.3-11 电弧停滞时间与触头侵蚀量的关系

对低压限流断路器来说，由上一节的分析可知，降低电弧停滞时间可以使开断后电弧电压迅速增长，提高断路器的限流性能。

若把开断过程中电弧电压的波形简化成如图 2.3-12 所示，在电弧停滞时间内让电弧电压取 $U_{arc} = 40V$ 不变，电弧开始运动后，电弧电压上升率为一常数 β ，电弧进入栅片后，电弧电压达到最大值 U_{arcm} 。保持 β 不变，改变电弧停滞时间 t_i ，当电源电压 $U_m = 400V$ 时，把图 2.3-12 所示的电弧电压波形代入式 (2.3-1)，用数值方法求解，可得不同电弧停滞时间 t_i 时，限流峰值 i_{lp} 、电弧能量 $\int U_{arc} i dt$ 和允通能量 $\int i^2 dt$ 与电弧电压幅值 U_{arcm} 之间的关系，如图 2.3-13 所示。

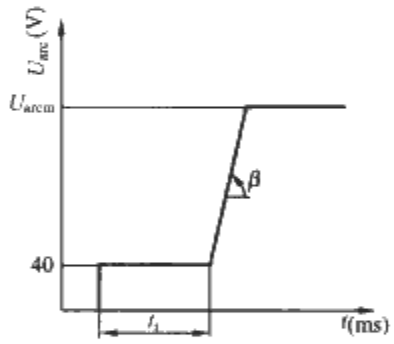


图 2.3-12 简化的电弧电压波形

由图 2.3-13 可见，当 β 为常数时，随着电弧停滞时间 t_i 的增加，限流峰值 i_{lp} 、电弧能量 $\int U_{arc} i dt$ 和允通能量 $\int i^2 dt$ 都增加，同时这三个量也随着 U_{arc} 的增加而减小，可见减小电弧停滞时间 t_i 有利于增强断路器的限流性能。

2.2 电弧停滞现象的机理

触头间呈现电弧后，要使电弧运动，必须使电弧前进方向形成新的阴极和阳极斑点，以及为电弧从老的通道转移到新的通道创造条件。当触头斥开，首先使接触点电阻不断增大，然后接触处金属熔化形成金属桥，当金属桥被拉断形成电弧时，周围空气温度尚低，电弧主要靠金属蒸气的离子束支撑，这时电弧属金属相电弧，电弧弧柱直径较大，电弧不易运动，直到电弧拉长到极限长度时，在外磁场作用下，使周围气体穿插进入电弧内部，让电弧中心温度升高，电流向中心集中，电弧变细，同时电弧光谱中呈现强烈的气体分子谱线，这时电弧转变为气相电弧，电弧在电磁力作用下才能开始运动。

在触头断开过程中，对应于电弧停滞时间存在一个电弧开始运动的极限长度，若触头打开距离小于这一间隙，则电弧就停滞不动。这一间隙值几乎与触头开断速度无关，

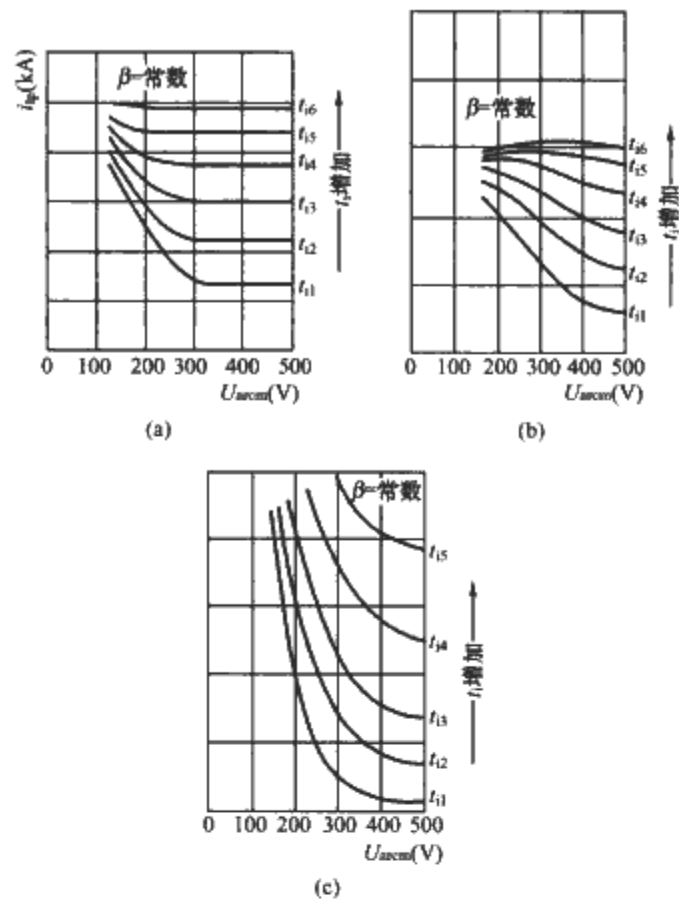


图 2.3-13 不同 t_i 时的限流性能

(a) 限流峰值与电弧电压幅值的关系；(b) 电弧能量与电弧电压幅值的关系；(c) 允通能量与电弧电压幅值的关系

E. Belbel和 L. Siffroi 用能量平衡关系推导了这一间隙 d 近似值计算公式

$$d = \frac{U_{arc}}{4B} \frac{\rho_s}{h} \sqrt{\gamma R_1 r} \tag{2.3-4}$$

式中： U_{arc} 为电弧电压； B 为磁感应强度； ρ_s 为触头材料密度； h 为金属蒸气的热焓； R_1 为理想气体常数； γ 为比热容比，是定压比热容 c_p 与定容比热容 c_v 之比，即 $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ 。

利用光谱分析，可获得电弧温度沿弧柱径向分布如图 2.3-14 所示，图中下方曲线为电弧点燃后 $50\mu s$ 的温度分布，上方曲线为 $350\mu s$ 后电弧即将开始运动瞬间的温度分布，可见后者温度分布曲线梯度增大，而弧柱电导的分布也相同。这就意味着电弧即将开始运动瞬间，在电弧弧柱中心形成高导电区，即电弧直径收缩，作用在弧柱上的电磁驱动力就容易驱使电弧运动，电弧直径变细，是由于外界气体混入弧柱时电弧由金属相转变为气相电弧的结果。图 2.3-14 中上方曲线的弧柱中心区域温度较下方曲线高是由于电弧进一步发展使弧柱热游离加速的原因。

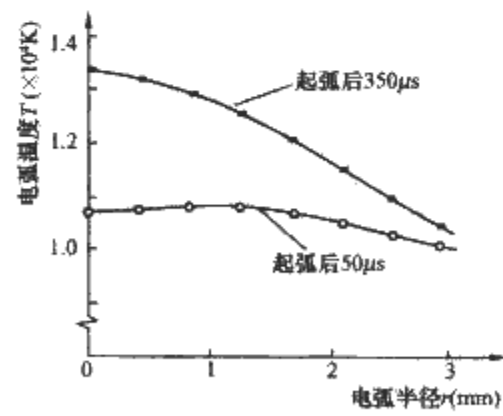


图 2.3-14 起弧后不同瞬间电弧温度沿弧柱径向分布图

2.3 影响电弧停滞时间的各种因素

影响电弧停滞时间的因素很多，其中主要的因素如下：

①触头区域的磁场；②触头的开断速度；③触头材料；④灭弧室的结构与器壁材料；⑤触头形状和表面情况。

从上面机理分析知磁场对电弧停滞现象有重要作用，所以这里首先介绍磁场对电弧停滞时间的影响。对银触头，在不同触头分断速度下，用实验方法获得的电弧停滞时间 t_i 与外加磁场磁通密度 B 的关系如图 2.3-15 所示，这里触头断开速度从 2m/s 变化到 5m/s。从图 2.3-15 上可见，电弧停滞时间随触头分断速度和磁通密度增加而减小。图 2.3-16 为银触头在停滞过程的光谱特性，触头分断速度皆为 $v=2\text{m/s}$ ，但图 2.3-16 (a) 的外加磁场 $B=0.2\text{T}$ ，而图 2.3-16 (b) 的外加磁场 $B=0$ ，电弧电压波形画在图的左上角。从图 2.3-16 (a) 中可见，待触头分离，随即可观察到氮离子光谱 NII 和银离子光谱 AgI，而图 2.3-16 (b) 的光谱特性，在触头分离后，仅见到 AgI 光谱。对比二者，二者的触头开断速度相同，而前者有外加磁场。从得到二者的光谱特性的氮离子光谱情况来看，有外加磁场时电弧从金属相电弧变为气相电弧时间较短，并从左上角电弧电压波形可知，其电弧停滞时间短，而后者其电弧转变为气相电弧时间较长，因

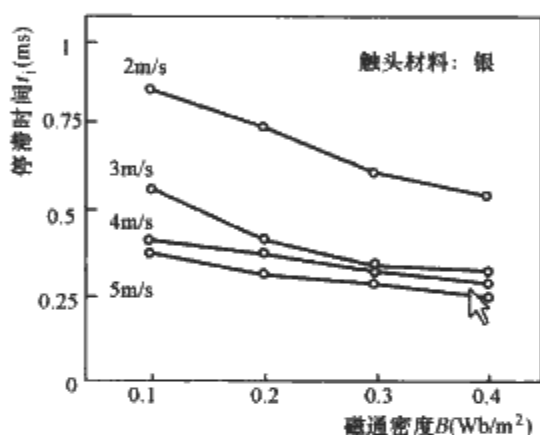


图 2.3-15 电弧停滞时间 t_i 与外加磁场磁通密度 B 的关系

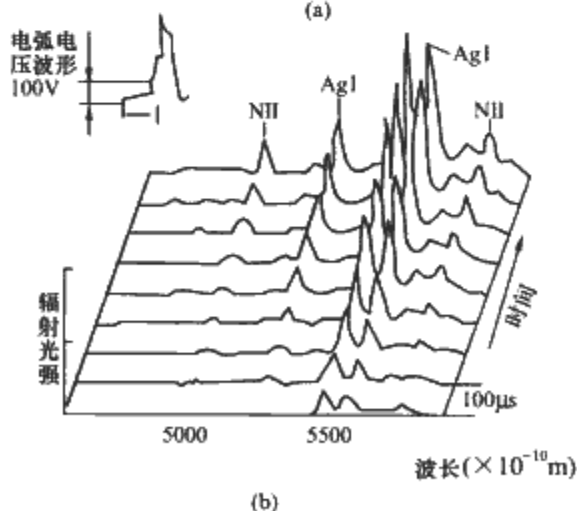
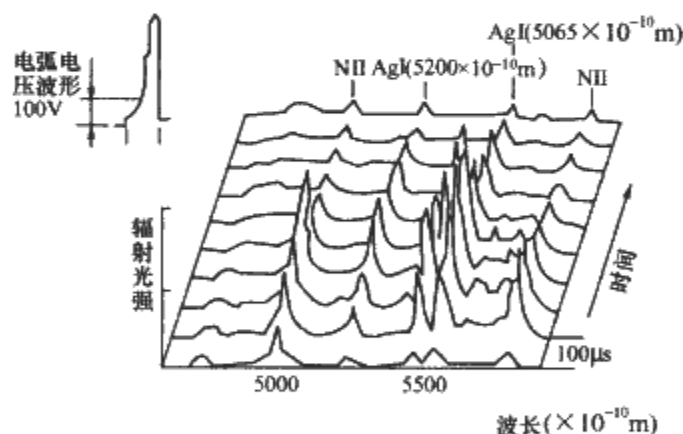


图 2.3-16 银触头在停滞过程的光谱特性，触头分断速度 $v=2\text{m/s}$
(a) 外加磁场 $B=0.2\text{T}$ ；(b) 外加磁场 $B=0$

而电弧停滞时间也长。从以上分析可知，提高触头开断速度，增加吹弧磁场，有利于提高限流断路器的开断性能。

图 2.3-17 所示为对一个模型灭弧室，分别采用三种不同的触头材料，在预期电流为 9.7kA 时，试验得到的停滞时间 t_i 与触头分断速度关系。从曲线上可看出，当分断速度 v 大于 3m/s 时， t_i 随分断速度增加而迅速减小，并与触头材料有密切关系，但当 v 大于 6m/s 时， t_i 随 v 的增加逐渐变缓并几乎与触头材料无关。

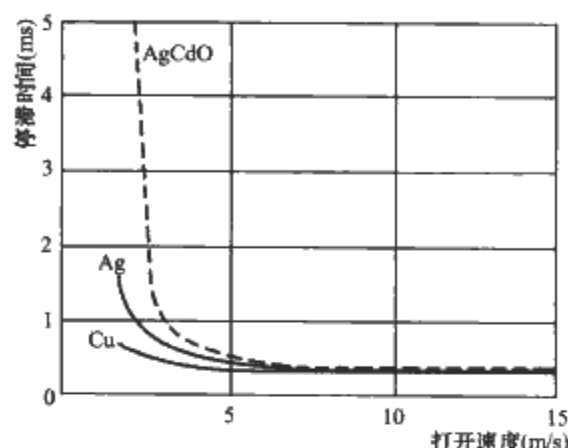


图 2.3-17 三种不同触头材料电弧停滞时间与触头打开速度的关系

电弧停滞时间 t_i 与触头材料有密切关系，图 2.3-18 是不同触头材料当电弧 $I=5\text{kA}$ 时在一个模型灭弧室中测得的电弧停滞时间对比，从结果可得出：熔点高的材料 t_i 较熔点低的材料低；纯金属的 t_i 较非均质材料的低。根据多位学者研究，发现电弧运动与电弧阴极是否有良好的场致发射条件有关，而这种条件仅在固体表面存在，低熔点材料的触头表面有熔池，则新的阴极斑点只有跳过熔池才能生成，这给阴极斑点生成造成困难。另一方面，对于低熔点材料，常会产生很强烈的等离子体云稳住电弧，同样给斑点运动造成阻力。对于非均质材料的触头，电弧斑点产生于高熔点材料成分部分上，而低熔点材料成分则通过强烈气化把电弧围住而不易运动。从图 2.3-18 来看，铜 (Cu) 的熔点较镉 (Cd) 为高，所以铜的电弧停滞时间较短，而纯金属材料包括 Cu、Ag、Ni、Cd 的电弧停滞时间都较非均质材料 Ag/Ni、Ag/Cd、Ag/CdO、Ag/C 为低。图 2.3-18 中的剖面线部分表示多次试验的偏差，图 2.3-17 三种材料在分断速度小于 6m/s 时，Cu 的停滞时间最短，其次是 Ag，时间最长的是 Ag/CdO，这也和图 2.3-18 中的结果一致。图 2.3-19 为目前低压电器中常用的几种银氧化物和银合金材料的电弧停滞时间和外加磁场的关系。

电弧停滞时间也与触头表面状态有关，电弧在粗糙的、擦干净的和多次经电弧烧过的表面运动，停滞时间较短；而在光滑的、氧化的和污染的表面运动，停滞时间较长。

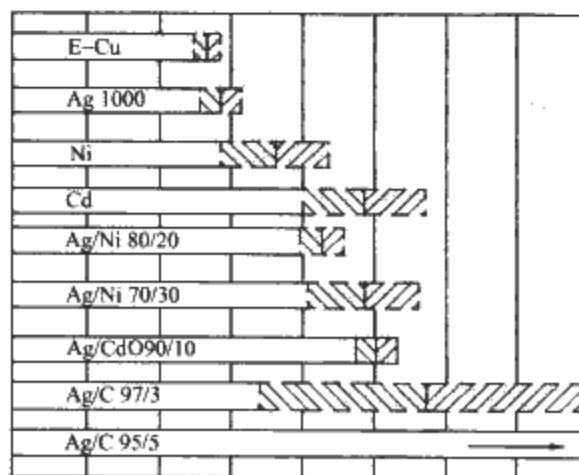


图 2.3-18 电弧停滞时间与触头材料的关系

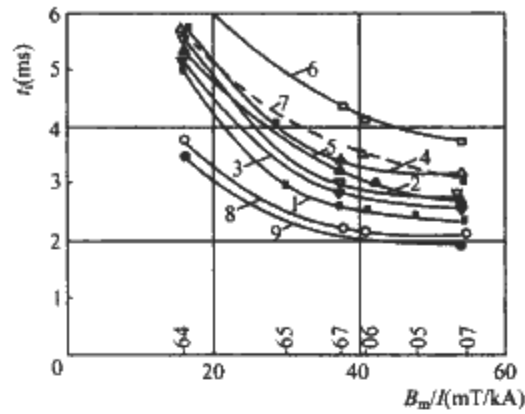


图 2.3-19 不同触头材料的
电弧停滞时间与外加磁场的关系
1—Ag/CdO_{90/10} 内氧化；2—Ag/CdO_{90/10} 粉末冶金；
3—Ag/CdO_{85/15} 内氧；4—Ag/SrO₂ 90/10；
5—Ag/ZnO_{92/8}；6—Ag/Ni_{90/10}；7—Ag/C95/5

电弧停滞时间还受灭弧室尺寸的影响。图 2.3-20 为当预期短路电流为 10kA，触头分断速度为 2.2m/s，不同灭弧室宽度 e 时 ($e=8\text{mm}$, 10mm , 13mm , 24mm) 触头上的电弧电压波形。由图 2.3-20 可以看出，随着宽度减小，灭弧压力增加，使电弧运动速度变慢，电弧停滞时间增长。

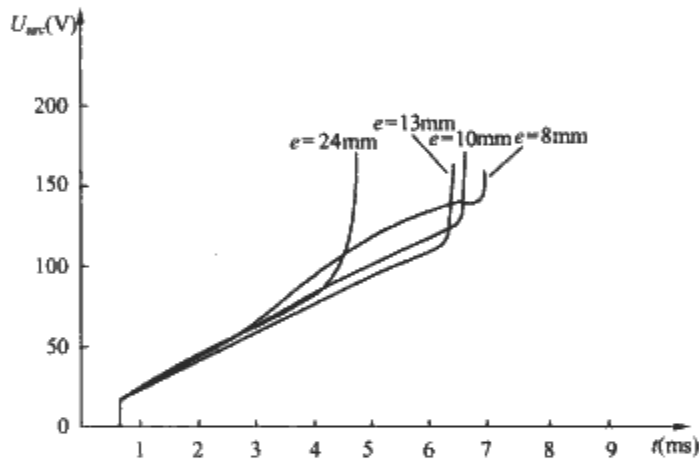


图 2.3-20 电弧停滞时间与灭弧室器壁宽度的关系
(速度=2.2m/s)

电弧停滞时间 t_d 与灭弧室器壁材料性质有关，产气材料的器壁会在电弧高温作用下产生气体，冷却电弧并使电弧直径变细，从而使电弧停滞时间变小。图 2.3-21 为在相同试验条件下，器壁材料分别采用三聚氰胺和酚醛树脂时的电弧弧柱沿径向温度分布。其中三聚氰胺为一种强烈产气材料，温度分布曲线的中心温度高而温度变化梯度大，也即由于产生氢气使电弧冷却而变细，因而用三聚氰胺作器壁材料的电弧停滞时间较用酚醛树脂的减少近 40%。

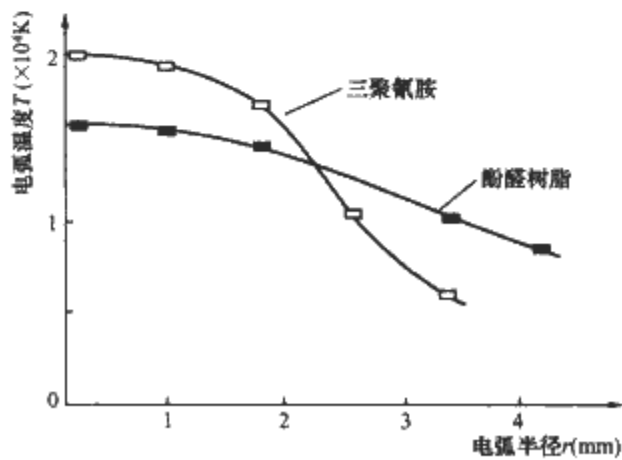


图 2.3-21 三聚氰胺和酚醛树脂的
电弧弧柱沿径向的温度分布

2.4 电弧从触头到弧角的转移

当电弧弧柱由金属相转变为气相电弧，电弧弧柱开始运动。但有的低压电器，电弧要通过弧角或弧道才能进入栅片，这样电弧在动静触头上的弧根或电弧斑点必须转移到弧角或弧道后电弧才能运动，这就要求电弧弧根要从触头台阶上移动到弧角上，或通过间隙跳到跑弧道上，这种情况，电弧停滞时间应该包括电弧从触头转移到弧角或跑弧道的转移时间。R. Michal 等人研究了电弧弧根转移的问题：电极的阴极和阳极弧根有不同的转移方式，阳极弧根有跳跃通过阻挡物的能力，所以阳极弧根遇到台阶或间隙时，能一跃而下或一跃而过，而阴极弧根的运动是连续的，它只能沿着阻挡物表面而连续移动。图 2.3-22 表示电弧在不同极性的台阶处运动的情况，当台阶在阳极和阴极时，弧的运动有不同的性态。图 2.3-22 (a) 所示的台阶在阳极，当电弧通过阳极台阶时，能一跃而过；而图 2.3-22 (b) 的台阶在阴极，电弧的弧根总是在电极表面连续运动，在遇到台阶时，它爬到台阶垂直部分，沿面而下，再继续前进。

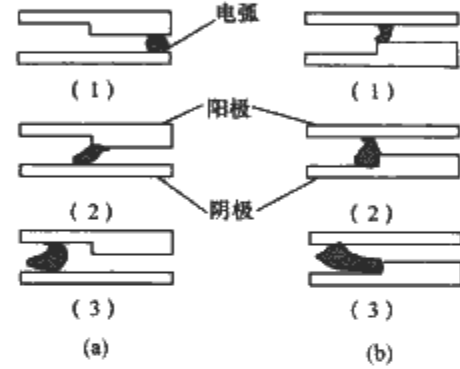


图 2.3-22 电弧在不同极性的台阶处的运动
(a) 阳极有台阶；(b) 阴极有台阶

为了验证电弧转移的特性，取一小型限流断路器为研究对象，在单频振荡回路做开断实验，预期电流为 3kA，用二维光纤阵列电弧摄像系统记录电弧运动过程，如图 2.3-23 所示，36 根光纤排列在灭弧室侧面，用电弧光的强度表示电弧运动位置。图 2.3-23 (a) 和图 2.3-23 (b) 分别为动静触头为阳极和阴极时电弧的运动图像。由图 2.3-23 可见：在起弧阶段，二者并无大的区别；但电弧从动触头转移到跑弧道的情况就不一样，由于电弧阳极弧根可以跳跃运动，当动触头为阳极时，电弧在 0.8ms 时就从动触头转移到跑弧道上，而当动触头为阴极时，由于阴极弧根运动的连续性，阴极弧根黏滞在动触头末端，直至 1.0ms 时，触头完全打开，电弧才能从动触头转移到跑弧道上。图 2.3-24 为动触头分别为阳极和阴极时电弧电压波形的对比，明显看出，由于转移过程的不同，动触头为阴极时电弧停滞时间明显长于动触头为阳极时的停滞时间，前者停滞时间为 0.75ms，而

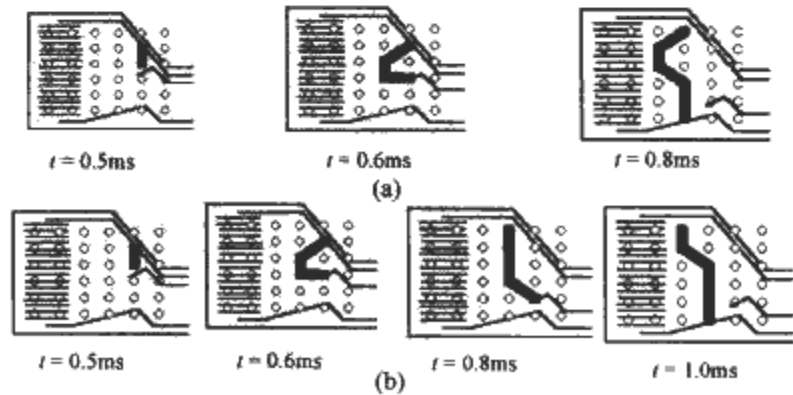


图 2.3-23 动静触头分别为阳极与
阴极时的电弧运动图像
(a) 阳极有台阶；(b) 阴极有台阶

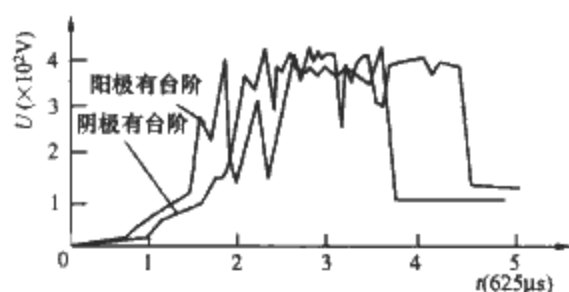


图 2.3-24 动触头分别为阳极和阴极时的电弧电压波形

后者延长至 0.93ms。

电弧从触头上的转移和触头形状有关。在一模型断路器上，用三种不同的形状（见图 2.3-25）的动触头进行实验，它们分别具有矩形 a、菱形 b、圆形 c 三种台阶。静触头为一平板，测得电弧停滞时间如图 2.3-25 所示。对于 a 结构的触头，动触头为阴极时电弧停滞时间较长；对于 b 结构触头，当动触头为阴极或为阳极时电弧停滞时间相差不大；而对于半圆形结构触头，动触头为阳极时电弧停滞时间最短，动触头为阴极时电弧停滞时间较长。从实验结果看：菱形结构停滞时间最短，这是由于它的几何形状有迫使弧根走向菱角尖的趋向；具有圆形台阶的结构，若作为阴极，电弧弧根在边缘的引诱下会跑向反方向，促使电弧沿边缘做来回运动，延长了停滞时间，作为阳极。由于圆形边缘提供了电弧快速跳跃的良好条件，所以停滞时间最短。

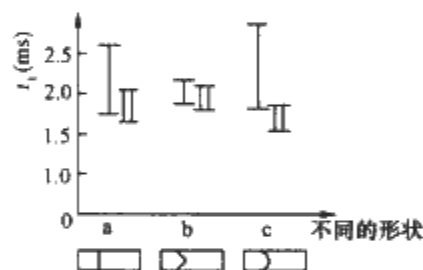


图 2.3-25 台阶几何形状对电弧停滞时间的影响
I—动触头为阴极；II—动触头为阳极

3 磁吹和气吹对电弧的冷却和驱动作用

低压电器开断过程经历了电弧停滞过程后，触头上的电弧就要开始运动。对电弧的驱动力，在 20 世纪人们主要着眼于研究磁吹对电弧的驱动和冷却作用。20 世纪末，由于对低压开关电弧气吹作用的进一步认识，近年来气吹在低压断路器灭弧室的设计中得到了广泛应用。本节着重讨论磁吹和气吹的机理，以及实现磁吹和气吹的灭弧室结构。

3.1 断路器触头系统的自励磁场

触头系统的自励磁场除有利于减小电弧停滞时间外，更重要的是对电弧产生磁吹作用。这里磁吹有两重意义：一个是对电弧产生洛伦兹力，驱动电弧进入栅片灭弧室；另一个作用是对电弧产生冷却作用。除此之外，触头系统的自励磁场与流过动触头杆的电流相互作用产生使动触头斥开的电动斥力，此力能帮助操动机构加速触头的分断，使电弧迅速拉长，有利于加速电弧电压的增长，所以自励磁场对断路器的开断性能有重要作用。

图 2.3-7 介绍了 5 种限流断路器触头系统结构，在触头斥开，触头间呈现电弧的条件下，方案 B 采用下进线 U 形静触头导电回路，虽然比方案 A 采用平板式静触头的自励磁场要强，但产生磁场的效率不高。图 2.3-26 为作用在电弧中心线上磁场的分析，其中把动、静触头导电回路分成 6

个单元，其中单元（2）为电弧，由图 2.3-26 可见，仅单元（1）和单元（3）产生的磁场是正方向的，能驱动电弧吹向灭弧室，而单元（4）、（5）、（6）产生的磁场都是负方向，会使电弧向反方向运动。

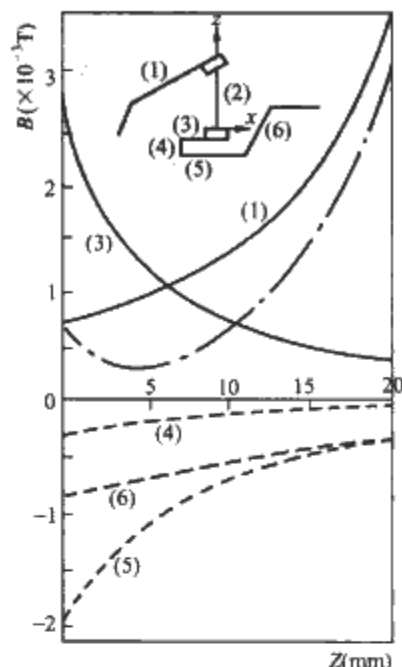


图 2.3-26 下进线 U 形静触头回路的磁场分析

插入 U 形电动机槽如图 2.3-27 所示，即图 2.3-7 中方案 D，可以增强触头区磁场并增大触头斥开后的电动力，对图 2.3-27 所示的触头系统模型在有电动机槽和去掉电动机槽的条件下，取电弧直径为 16mm，用三维有限元磁场分析，计算求得的电动斥力与开断电流关系如图 2.3-28 所示，可见由于磁场的增强，有电动机槽的电动斥力较无电动机槽的有较大的电动斥力增强。进一步提高自励磁场可采用上进线静触头导电回路，如图 2.3-29（a）所示，为了使动触头能在上进线回路内运动，进线后，导电回路分成前后两半，动触头处于中间，为了便于观察，图 2.3-29（a）中的前面一半已截去。上进线导电回路的电流流动方向如图 2.3-29（b）所示，图中电流单元（1）、（2）、（3）、（4）和（5）产生的磁场都是正的，都能驱动电弧向灭弧室栅片移动，并且

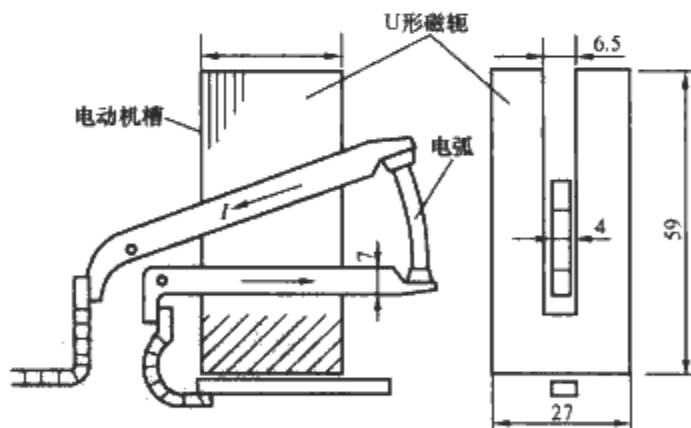


图 2.3-27 在最大打开位置带电动机槽的触头系统（单位：mm）

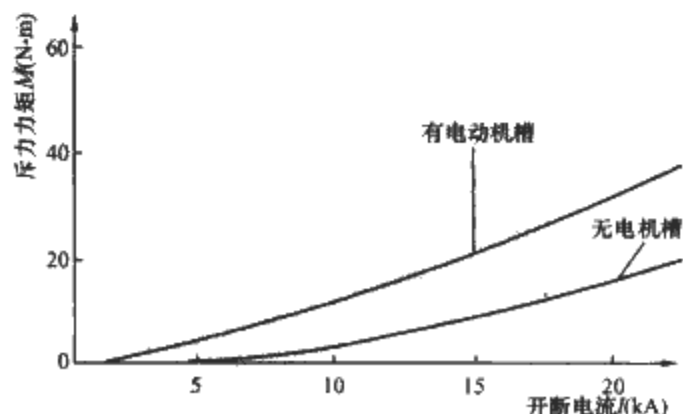


图 2.3-28 电动斥力力矩与开断电流关系

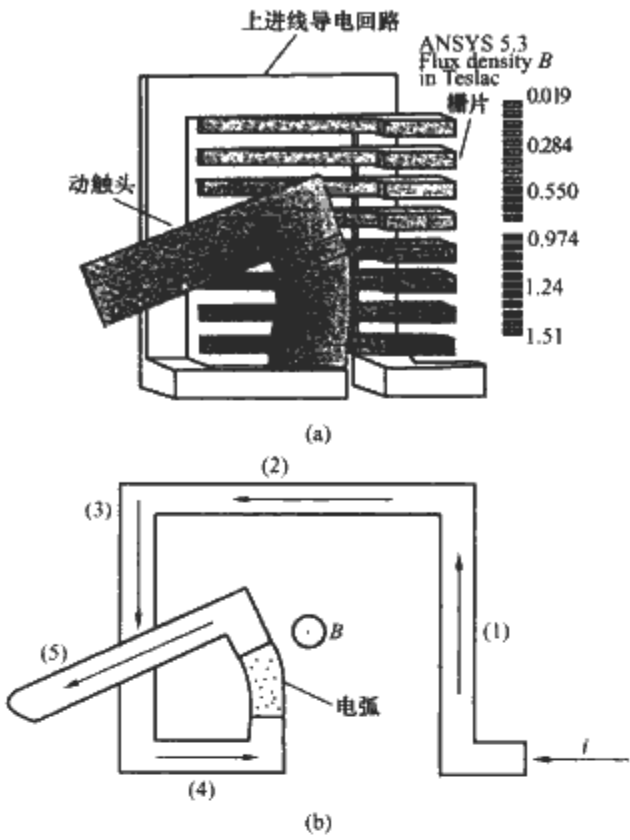


图 2.3-29 上进线静触头导电回路

(a) 导电回路结构与磁场分布图；(b) 导电回路的电流流动方向
电流单元 (1)、(2)、(3)、(4) 和 (5) 与动触头电流单元产生的电动斥力都是促使动触头斥开的。因而这种结构有利于增强触头打开时的电动斥力和吹弧磁场。图 2.3-30 为对两种进线结构的磁场和电动斥力进行了仿真对比，由图可看出采用上进线电流回路可大幅度提高电动斥力和吹弧磁场。

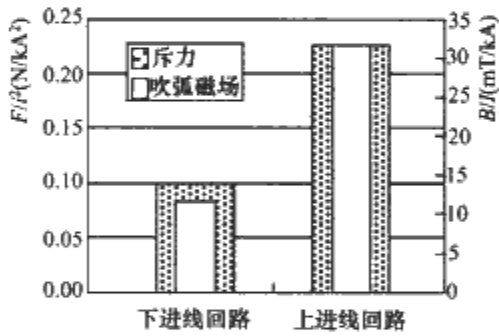


图 2.3-30 两种进线结构的电动斥力与吹弧磁场对比

3.2 气吹对电弧的冷却和驱动作用

3.2.1 基于灭弧室内气体的高温形成的气吹

传统的气吹灭弧技术一般用于高压断路器，20 世纪以来人们也开始注意这种技术用于低压断路器的可能性。低压断路器的自动气吹技术主要依靠电弧的能量，使灭弧室的压力增高，这个压力与灭弧室外界大气压之间的压力差就可以形成由灭弧室通过出气口的气流，这一气流有两种作用：一种是对电弧产生冷却作用；另一种是产生对电弧的驱动力，迫使电弧进入灭弧栅片。传统的低压塑壳断路器，依靠自励磁场驱动力，一般灭弧栅片间的间距取 2mm 左右，但采用气吹以后，新型断路器，额定电流在 250A 的框架，栅片间距可减小到 1~1.5mm，因而在相同灭弧室体积条件下，灭弧栅片可增多。传统的无气吹塑壳断路器一般栅片数在 7 片左右，而新型有气吹的断路器在同一灭弧室尺寸下栅片数可增加至 10~11 片。这就大幅度提高了断路器的开断能力。

要依靠电弧能量提高灭弧室压力来产生气吹作用，有两种途径：一个是利用电弧高温加热灭弧室内气体来形成气吹；另一个是在灭弧室内放置产气材料，在电弧高温侵蚀后产生大量气体，促使灭弧室压力增高，而形成气吹。

首先来讨论由于灭弧室内高温形成的气吹。

当灭弧室内呈现电弧时电弧的能量将大部分用于加热灭弧室内的气体，根据理想气体状态方程

$$pV = mRT \quad (2.3-5)$$

式中： p 为灭弧室内压力； V 为灭弧室体积； m 为灭弧室气体质量； R 为普适气体常数； T 为灭弧室温度。

设在 dt 时间内，电弧供给灭弧室的能量为 dQ ，气体通过出气口消耗的能量为 dE ，则根据能量平衡方程，导致灭弧室温度和压力上升的能量为

$$d(m c_v T + pV) = dQ - dE \quad (2.3-6)$$

式中： m 为灭弧室气体质量； c_v 为气体定容比热容； Q 为电弧提供给灭弧室的能量； E 为气体通过出气口消耗的能量。

其中

$$dQ = K_p u_{arc} i dt \quad (2.3-7)$$

式中： K_p 为电弧能量转换成压力上升部分的比例系数， $K_p < 1$ ； u_{arc} 为电弧电压； i 为电弧电流； t 为时间。

出气口消耗的能量

$$dE = K/(K-1) (p/\rho) \alpha A \rho_n v_n dt \quad (2.3-8)$$

式中： K 为气体绝热指数，对空气 $K=1.4$ ； ρ 为灭弧室内气体密度； A 为出气口面积； α 为气体摩擦和收缩系数； ρ_n 和 v_n 分别为出气口的气体密度和速度。

将式(2.3-5)、式(2.3-7)、式(2.3-8)代入式(2.3-6)，可得

$$\frac{dp}{dt} = \frac{R}{(c_v + R) V} (K_p u_{arc} i - \frac{K}{K-1} \frac{p}{\rho} \alpha \rho_n v_n A) \quad (2.3-9)$$

由式(2.3-9)可以看出，灭弧室压力的变化率 dp/dt 随电弧供给的能量 $K_p u_{arc} i$ 增大而增大，而随出气口面积 A 的增加而减小。

电弧提供给灭弧室的能量，造成灭弧室内气体温度和压力上升，但是利用这一压力形成气吹，还要通过对灭弧室结构的特殊设计。

传统的塑壳断路器灭弧室结构如图 2.3-31 (a) 所示，灭弧室上端有排气口，而下端与断路器的机构和脱扣器相通，因而相当于灭弧室上下都有出气口，这样形不成通过上排气口驱动电弧的强烈气流。为了堵塞下出气口，图 2.3-31 (b) 在灭弧室下部用一带开口槽的弧形隔板把灭弧室与断路器下半部分隔开，隔板上带槽是为了在断路器操作时让动触头杆可在其中运动，动触头杆上带有与开口槽相匹配的弧形绝缘挡板，动触头开断时，弧形挡板堵住开口槽使灭弧室与断路器下半部分封闭，这样就可存贮气体压力，产生对电弧的气吹作用。

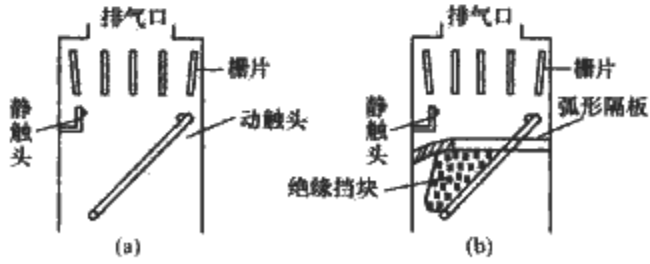


图 2.3-31 两种不同出气口的灭弧室
(a) 传统灭弧室结构；(b) 灭弧室下端出气口堵住的结构

另一种结构是把每一相的灭弧室制作成一个仅带一个出气口的半封闭单元，把动触头的转轴也由传统的在灭弧室外

端引入到这一半封闭单元中,这样就不存在下出气口的问题,图 2.3-32 为这种结构的一个灭弧单元,灭弧室内由电弧能量造成的压力升高,通过唯一的排气口,形成对电弧的强有力气吹。

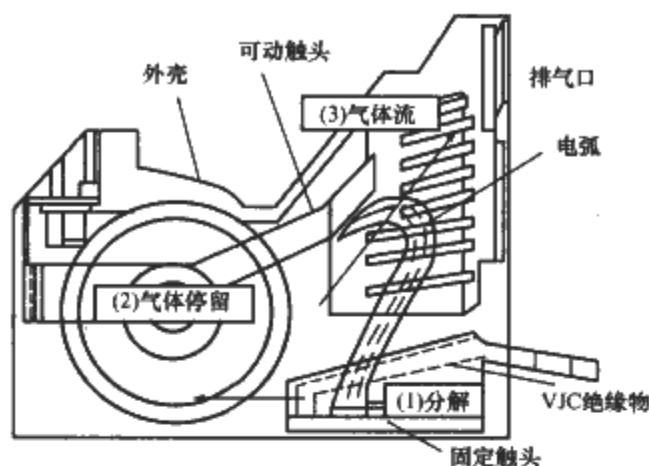


图 2.3-32 半封闭的灭弧室单元

3.2.2 基于电弧对产气材料的侵蚀造成的气吹

由开断电弧产生的电弧温度可达 $3000 \sim 30\,000^{\circ}\text{C}$, 远超过产气绝缘材料的气化温度。在电弧高温作用下,绝缘材料受电弧侵蚀而产气,使灭弧室内压力增高,通过上端出气口形成高速气流来驱动和熄灭电弧。一般对产气材料来说,要求产生的气体在电弧温度作用下有良好的导热性,特别是能产出较多的氢气以利于冷却电弧。由于产气材料气化时要消耗电弧能量,产生的气体较空气有更好的导热性,因而这种气吹方式较上面介绍的单靠电弧加热气体介质实现气吹的方案要有效。

设电弧在一长方形灭弧室内燃烧,灭弧室内壁由产气绝缘材料制作,如图 2.3-33 所示,该长方形截面为 A , 上端全部开口。根据动量平衡

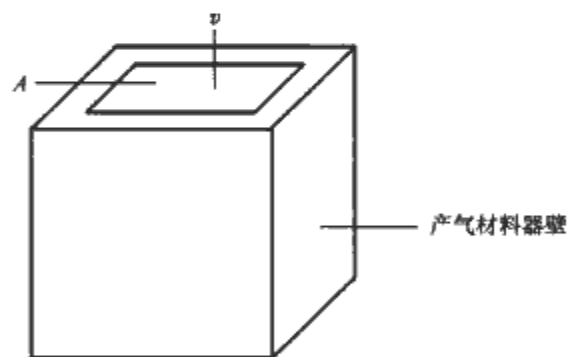


图 2.3-33 长方形灭弧室

$$\Delta p_h A \Delta t = Mv \quad (2.3-10)$$

式中: Δp_h 为由于器壁产气引起灭弧室压力的增量,它是灭弧室压力与环境压力之差; M 为气体介质的质量; v 为气流的流速; A 为灭弧室出口处截面; Δt 为时间增量。

假设出口处流速为声速 c , 式 (2.3-10) 可改写成

$$\Delta p_h = \frac{M}{\Delta t} c A = \dot{M} c / A \quad (2.3-11)$$

式中: \dot{M} 为单位时间的流量。

设出口处产生的质量流是由于电弧侵蚀产气材料所造成,并认为电弧用于侵蚀材料消耗的功率为 $k_h u_{arc} i$, 这里 k_h 为侵蚀材料消耗功率占的总电弧功率的比例系数,则

$$h \dot{M} = k_h u_{arc} i C \quad (2.3-12)$$

式中: h 为使产气材料质量 M 气化所需要的能量,这里用焓表示。

把式 (2.3-12) 代入式 (2.3-11) 可得

$$\Delta p_h = \frac{k_h u_{arc} i C}{h A} \quad (2.3-13)$$

由式 (2.3-13) 可知,由电弧侵蚀材料在灭弧室内引起的压力增量 Δp_h 与电弧消耗在材料气化上的功率成正比,而与材料气化所需的焓和出气口面积成反比。

如图 2.3-34 所示的五种产气材料放置方式都可产生气吹效应。图 2.3-34 (a) 在动触头两侧放置产气绝缘材料,这种方案也称为金属蒸气喷流控制技术,因为绝缘材料产生的气体可以对触头断开时的金属蒸气起控制作用,后者在电弧开断阶段是电弧导电的基础。图 2.3-34 (b) 是用一绝缘产气材料的套子套在栅片的两条腿上,触头开断后的电弧能很好地与产气材料接触。图 2.3-34 (c) 的方案是一种被称为冲击窄缝加速器的结构,在静触头附近放置产气绝缘材料,并在触头区形成一个窄缝,当触头开断时,利用缝内器壁绝缘材料产气,形成与窄缝外介质的压力差,造成一股向槽外的强烈气流,这股气流不但有利于熄弧,并且也推动动触头,加快斥开速度。图 2.3-34 (d) 的结构是在灭弧室器壁两侧放置产气材料的绝缘片,绝缘片内包有铁片以增强磁吹,这种结构由于产气绝缘片占了一定空间,因而栅片采用短栅片,没有传统栅片的两条长腿。若把产气的两种方法结合起来,即把图 2.3-31、图 2.3-32 与图 2.3-34 的结构结合起来就能获得更好的气吹作用。图 2.3-34 (e) 的结构也称为电动机槽,它是在 U 形铁磁体外包产气材料,并把它以倒 U 形方式套在触头上,也可以在出口处形成强烈气喷。

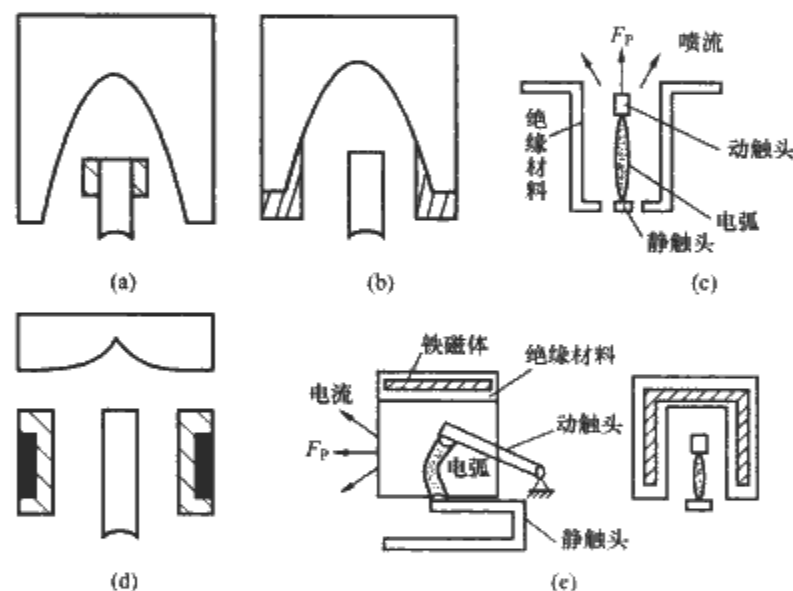


图 2.3-34 五种带产气材料的灭弧室

美国伊登公司 (Eaton Corporation) 研发中心的 Xin Zhou 通过一实验模型,得出了产气材料对电弧运动速度的影响。图 2.3-35 为实验装置的顶视图,装置的上下有两个长电极,长度为 81.28mm ,它也是电弧的跑弧道,电极间隙为 7.64mm ,装置的器壁用耐热玻璃制作,以便于用快速摄像机观察电弧运动,不同产气材料薄片,宽度为 7mm ,放在跑弧道路径离起弧点 12.7mm 处,用细铜丝起弧。电弧运动的记录采用多媒体 CCD 快速摄像机,拍摄速度为 $12\,000$ 幅/s。以振荡回路提供短路电流,电流幅值为 10kA 。

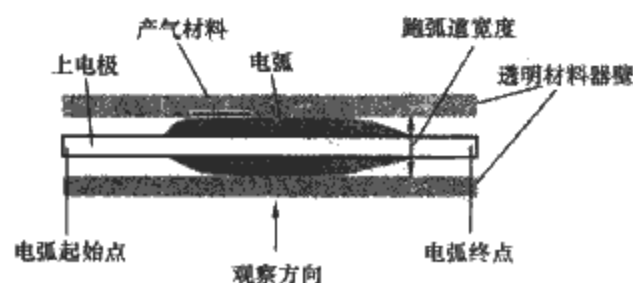


图 2.3-35 实验装置顶视图

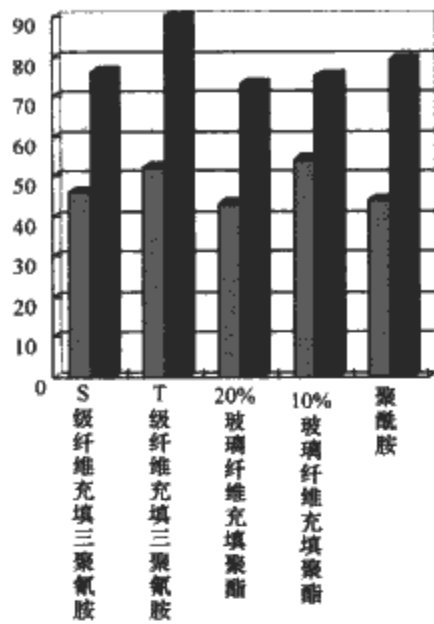


图 2.3-36 采用不同产气材料薄片时, 电弧在薄片前和进入后的速度对比

■——进入产气材料前的速度; ■——在产气材料中的速度

产气材料薄片分别采用: S 级和 T 级纤维充填三聚氰胺, 20%和 10%玻璃纤维充填的聚酯和聚酰胺 (POM₁₂), 从图 2.3-36 中可见, 电弧在进入产气材料前, 不同产气材料电弧运动速度在 46~54m/s 波动; 进入产气材料后, 电弧运动速度在 71~91m/s 之间波动。可见进入产气材料后, 由于产气材料的气吹作用, 电弧运动速度有较大的提高。

4 电弧进入灭弧栅片后的背后击穿现象

在低压开关电器开断过程, 电弧经历了电弧停滞过程后开始运动, 电弧从触头上转移到跑弧道并进入灭弧栅片以至熄灭。传统的观点论为电弧进入灭弧栅片后就熄灭了, 但近年来的研究指出, 电弧进入灭弧室后会产生一种电弧背后击穿或背后转移现象, 即电弧从栅片转移到它的背后区域, 也就是触头区域, 然后电弧再从触头区运动到栅片, 这一过程会反复多次, 直到电弧熄灭, 电弧背后击穿现象会严重影响开关电器的开断特性。这里介绍这种现象的产生机理和消除和防止这种现象的方法和措施。

4.1 电弧的背后击穿现象的电路模型

在低压电器开断过程中, 当开断电弧沿跑弧道进入栅片瞬间, 由于电弧被栅片分割成许多短弧, 电极压降的叠加使电弧电压有一个跳跃, 其值为

$$U_{arcn} - U_l = (n + 1) \Delta U \quad (2.3-14)$$

式中: ΔU 为极间压降, 为阳极压降 U_a 和阴极压降 U_c 之和; U_{arcn} 为电弧进入栅片后的电弧电压峰值; U_l 为弧柱压降; n 为栅片数, 分割的短弧数为 $n+1$ 。

这一电弧电压的突然增加, 一方面对低压断路器来说, 可有效限止短路电流, 减少开断的电弧能量, 但另一方面由于电弧背后区域, 即跑弧道和触头区域, 尚存在温度较高的游离气体, 在这一电弧电压作用下会发生热击穿而产生新的电弧。新的电弧的出现短接了原来已进入栅片的电弧并使之消失, 这相当于电弧从栅片中退出来, 并向栅片后方转移, 这种现象反复出现, 会使电弧电压出现毛刺, 即反复跌落现象, 它会影响限流断路器的限流性能和非限流断路器及接触器的开断性能, 这一现象国际上已把它统称为电弧背后击穿现象或背后转移现象。

用图 2.3-37 (a) 所示低压断路器的模型来解释上述背后击穿现象。模型分成三个区域: I 为触头区域, II 为跑弧

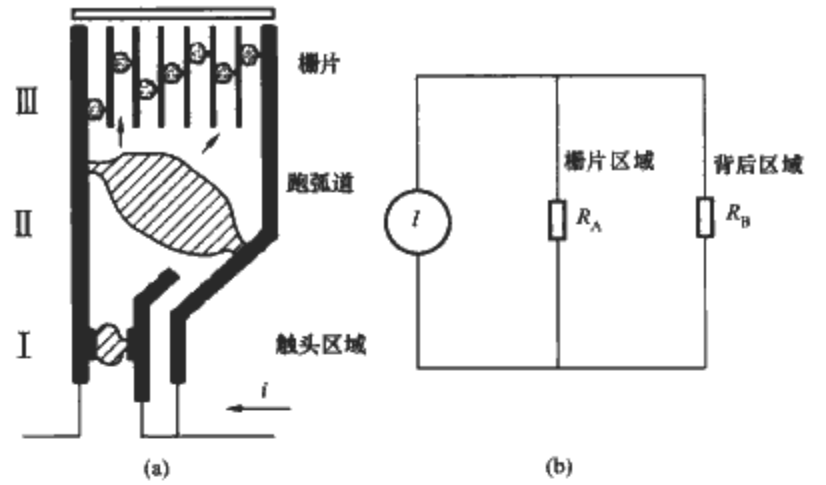


图 2.3-37 背后击穿现象的物理模型和电路模型
(a) 低压断路器模型; (b) 背后击穿的电路模型

道, III 为栅片。当电弧从触头区通过跑弧道进入栅片被分割成许多短弧, 而背后区域的跑弧道和触头间隙仍存在一定游离气体, 并保持一定温度, 这时可用图 2.3-37 (b) 所示的电路模型来说明背后击穿现象。将栅片区和背后区看作两个并联的电流回路, 各用两个可变电阻 R_A 和 R_B 来表示, 由于背后击穿过程很短暂, 假定通过断路器的总电流 I_{tot} 不变, 则电路模型可视为一电流源电路。当电弧电压由于近极压降的叠加而骤增时, 背后区域的输入能量增大。若这一能量大于以传导、对流和辐射三种方式由背后区域输出至外界能量, 则背后通道温度增加而使其电导变大, 等效电阻 R_B 变小, 使电流向背后区域转移, 并进一步由于输入能量增大而使其温度继续增高, 这一过程进一步发展就造成电弧的热击穿, 栅片区等效电阻 R_A 被急骤减小的背后区域等效电阻 R_B 短接, 电弧电流转移到背后区域, 并出现了电弧电压的骤降。

为了证实断路器开断过程中电弧背后击穿及转移现象是由于热击穿引起, 施耐德公司的 C. Fievet 作了试验研究, 在一个模型断路器上, 由振荡回路提供峰值为 5kA 的开断电流, 用非常灵敏的测量装置测量电弧进入栅片后背后区域的剩余电流, 并用光谱分析仪测量背后区域的气体温度, 测量结果显示, 背后区域的剩余电流峰值可达 10A, 气体温度为 3800~4600K, 这说明当电弧进入栅片后背后区域不是一个绝缘介质, 由于温度仍偏高, 所以背后区域的气体有一定导电性。剩余电流的存在说明了背后击穿或转移现象是一种电流从栅片区通过热击穿直接向背后区域转移的过程, 而背后区域的新电弧也与原在该处的剩余电流有关。电弧背后击穿现象与交流电流过零后电弧重击穿现象不同, 它是发生在开断过程中电弧运动阶段, 是由于背后区域在电弧电压骤升而发生热击穿造成的一种现象。

图 2.3-38 为低压断路器开断过程中不存在背后击穿

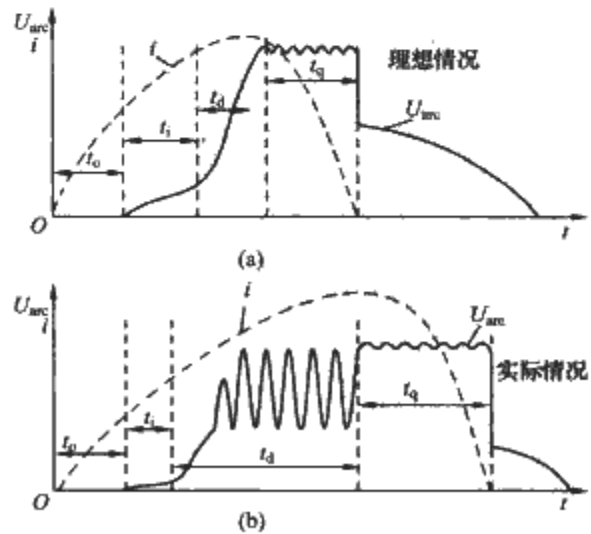


图 2.3-38 低压断路器开断过程的波形
(a) 不存在背后击穿; (b) 存在背后击穿

[见图 2.3-38 (a)] 与存在背后击穿现象 [见图 2.3-38 (b)] 两种情况的对比。两个电弧电压波形 $U_{arc}=f(t)$ 的动触头斥开过程 (对应时间为 t_0) 和电弧停滞过程 (对应时间 t_1) 是相同的。由于电弧运动速度很快 ($50\sim 100\text{m/s}$)，不存在背后击穿现象的情况；电弧由触头间隙移动至灭弧室所需时间 t_d 很短，而存在背后击穿的情况。由于反复的重击穿，使电弧在灭弧室和触头区多次逆向转移，它的等效电弧运动时间 t_d 远超过不存在背后击穿情况，电弧进入灭弧室后至熄灭所需时间为 t_q 。

比较图 2.3-38 (a) 与 2.3-38 (b) 在电弧运动过程的波形可看出，图 2.3-38 (a) 中电弧一次进入栅片，电弧电压波形不呈现毛刺，而图 2.3-38 (b) 中电弧电压由于反复重击穿现象，呈现多次电弧电压的骤降，也即波形上出现了毛刺，并使这一阶段电弧电流下降速度变慢，这过程一直持续到背后区域的游离气体逐步消失，触头开距因动触头运动而增长到足够长度，使背后区域的耐压强度大于 U_{arc} 才结束。由图 2.3-38 中可明显看出，由于反复背后击穿现象使整个开断过程的燃弧时间增长，限流断路器的限流作用削弱，影响断路器和接触器的开断性能，并增加了电弧对触头的侵蚀。

图 2.3-39 为用一 CCD 高速摄像机观察电弧的背后击穿现象所记录的图像。观察对象为一模型灭弧室，以振荡回路提供电源，实验时预期短路电流 3000A，开断过程中出现多次背后击穿和转移现象，图 2.3-39 为其中一次背后击穿的图像。

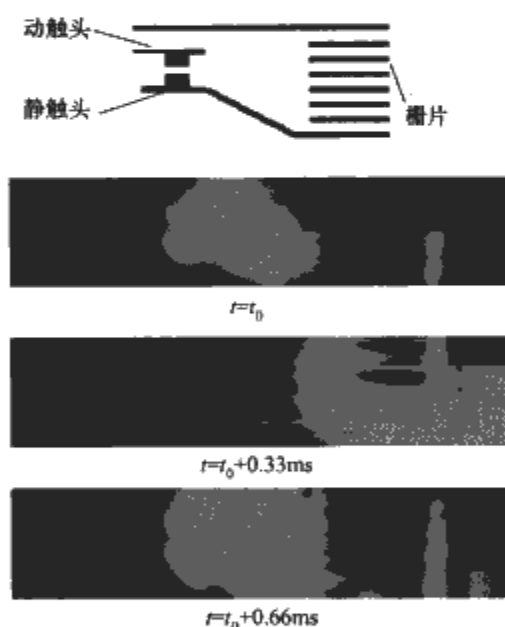


图 2.3-39 背后击穿的图像

从图像上可以看出，在 t_0 时刻电弧充满灭弧栅前的空间，在 $t_0+0.33\text{ms}$ 时刻电弧基本进入了灭弧栅，在 $t_0+0.66\text{ms}$ 时刻电弧在进入灭弧室后又退出了灭弧室，背后转移发生时间在 0.3ms 内。同时也可以看到开断电弧几乎充满了整个灭弧室。

4.2 背后通道热击穿条件分析

若输入背后区域的能量为 W_{in} ，输出的能量为 W_{out} ，则是否产生热击穿的条件可归纳为：当 $W_{in}>W_{out}$ ，发生热击穿； $W_{in}<W_{out}$ ，不发生热击穿； $W_{in}=W_{out}$ 为临界状态。德国的 W. Clemens 等从能量平衡方程式出发，忽略对流和辐射散热，得到以下的能量平衡关系式

$$\sigma E^2 + \text{div}(\lambda \text{grad} T) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3-15)$$

式中： σ 为通道的电导率； E 为通道电场强度； λ 为热导率；

T 为温度； ρ 为气体密度； c 为比热容。

当通道区处于临界情况，并认为通道内温度仅随距灭弧室器壁距离而变，如图 2.3-40 所示，则简化式 (2.3-15) 得

$$\sigma E_{crit} + \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (2.3-16)$$

$$W_{in} = \sigma E_{crit}$$

$$W_{out} = - \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right)$$

式中： E_{crit} 为发生热击穿的临界场强。

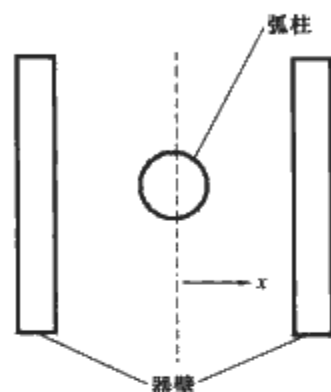


图 2.3-40 通道内温度随距灭弧室器壁距离 x 而变

用解析法求解式 (2.3-16)，可得临界场强 E_{crit} 与通道中心温度 E_{crit} 的关系，如图 2.3-41 所示。由图 2.3-41 显示，在 $T_c=4000\sim 6000\text{K}$ 时 E_{crit} 变化很大，当 $T_c>6000\text{K}$ ，则 E_{crit} 变化趋于平坦。由此可见，背后通道的热击穿与处于临界情况时通道的温度有密切关系。

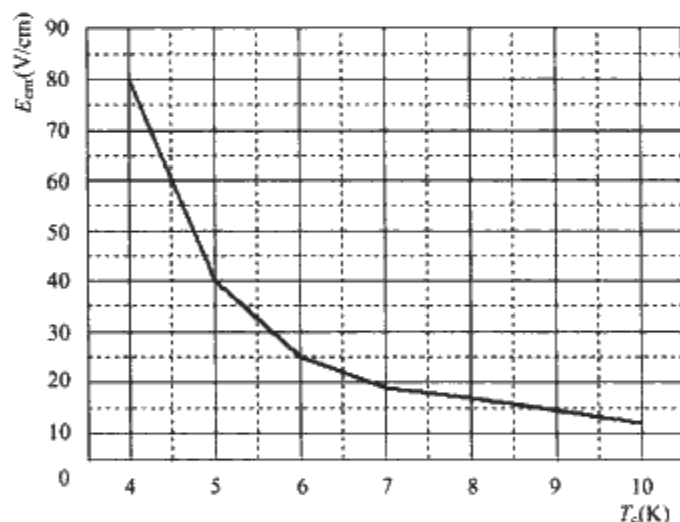


图 2.3-41 临界场强 E_{crit} 与通道中心温度 T_c 的关系

上面从背后区域能量平衡来确定背后区域热击穿条件，为了用等效的击穿电压来表示背后击穿条件，也可用下式来表示

$$E_{crit} l \leq (n+1) \Delta U \quad (2.3-17)$$

式中： E_{crit} 为背后区域热击穿的临界电场强度； l 为触头开距。

以上可明显看出，提高热击穿临界电场强度 E_{crit} ，也即冷却背后区域，降低背后区域的气体游离程度，以及使触头快速打开，增大触头间开距，都可抑制背后击穿现象。

从以上分析明确指出，背后区域的温度决定了背后击穿的程度，实际上，通道温度也就是表示通道中气体的游离程度，因而采取措施冷却背后区域，使背后通道的温度下降，就可抑制背后击穿现象。根据大量实验得出，电弧进入栅片

后,它造成的热气流将会经灭弧室后壁反射,这种反射的热气流进入背后区域会提高背后区域的温度和气体的游离,因而采取措施,防止热气流反射进入背后区域,也是抑制背后击穿现象的一个重要方面。

4.3 消除和减弱背后击穿现象的方法和措施

由以上分析可知,设法降低背后区域的温度和气体游离程度可有效抑制背后击穿现象,特别是要防止热气流通过灭弧室后壁的反射。这里介绍几种具体的方法和措施。

4.3.1 在断路器的灭弧室外侧设置热气流吸收装置或缓冲室

既然触头间隙重击穿现象是由于热气流反射进入触头区而造成的,但实验证明,把灭弧室后壁开一很大出气孔,虽然热气流被排出了,但容易造成电弧喷弧距离过大,并且电弧跑出灭弧室,电弧电压反而大幅度降低,并且有可能造成三相短路。有效的措施是在灭弧室外侧设置吸收装置或热气流缓冲室,如图 2.3-42 所示。图 2.3-42 (a) 所示吸收装置可采用金属网等结构,用于吸收热气流中带电粒子,并降低热气流的温度,这种装置不但能防止热气流反射,抑制背后击穿,还可用这种装置减弱和消除开断过程的飞弧。图 2.3-42 (b) 缓冲室可让热气流在缓冲室内得到冷却后,才由出口处排出。

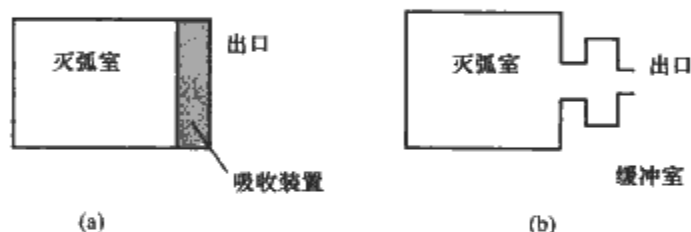


图 2.3-42 利用吸收装置或缓冲室防止热气流反射
(a) 出口处设置吸收装置；(b) 出口处设置缓冲室

4.3.2 设置气流循环系统

在如图 2.3-43 所示的小型断路器触头两侧放置两块由塑料压制、内含导磁片的平板,这两平板与灭弧室侧面器壁形成两股热气流通道:在开断过程中电弧的热气流一股通过灭弧栅片,由后壁的排气孔排出;另一股通过上述通道返回触头区域,这股热气流由于通道壁传热和对流冷却作用,温度和游离程度大为降低,进入触头区域有利于减弱重击穿现象,平板中的导磁片用于增加电弧驱动力。

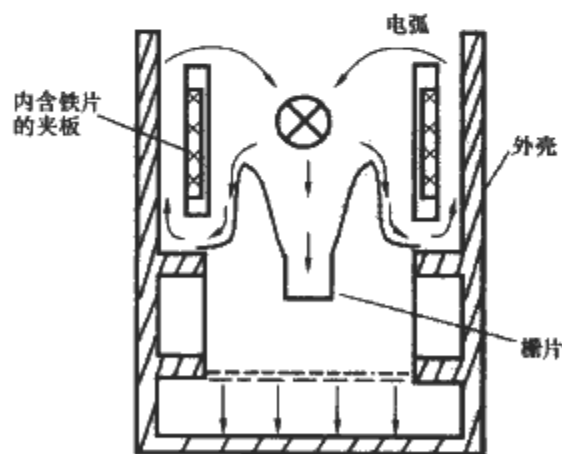


图 2.3-43 设置气流循环系统

以上介绍的方法,着重于防止热气流的反射,而降低背后区域的温度、可以有更多的措施,例如设法减小电弧停滞时间,可以降低电弧消耗在背后区域的能量,从而起降低背后区域温度的作用。在跑弧道两壁设置产气材料,在电弧作用下,产气材料产生的气体可有效冷却背后区域,达到抑制背后击穿现象的效果。

5 电弧电流过零后的介质恢复与重燃现象

5.1 两种重击穿现象

随着电力事业的发展,要求断路器在不断减小尺寸的条件下,提高断路器的开断性能,也即在更小的灭弧室容积和触头间隙的条件下,达到高的开断能力。一般的断路器工作在 400V 的条件下,但矿井等特殊工作环境工作电压上升至 690V,后者对断路器的工作提出更高的要求,特别是电弧电流过零后,要求灭弧室的介质恢复过程能保证在电流过零后不致被击穿而重新呈现电弧。

低压交流开关电器的成功开断,不论是塑壳限流型或是万能式非限流型断路器,以及接触器都决定于电弧电流过零后两个过程上升的速率,一个是触头间隙的电弧等离子体冷却过程,另一个是网络上恢复电压上升到幅值的过程。如第 2 章所述,电弧过零后有两种重燃过程,一种是介质重燃,另一种是热重燃。对介质重燃过程来说,触头间隙处于介质状态,恢复电压要上升到一定值才能击穿触头间隙,因而电弧电流过零后有一个零休时间,如图 2.3-44 所示。起始阶段,触头两端为电弧电压,到 t_a 时刻,电流达零点,这以后间隙中有两个过程,一个为电压恢复,一个为介质恢复,到 t_b 瞬间,两者相交,间隙被击穿,因而 t_b 点以后,触头间又呈现电弧电压,故障电流继续在触头间流通。在 $t_b - t_a$ 时间间隔内,触头间无电流,为零休时间。

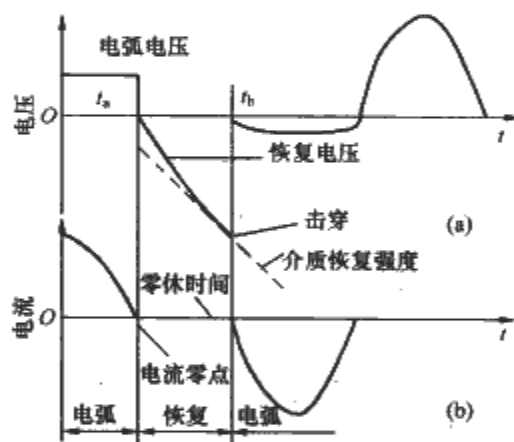


图 2.3-44 电弧过零的介质击穿
(a) 触头两端电压波形；(b) 电流波形

对于热重燃过程来说,电流过零后,高导电的弧柱快速冷却和电导率下降,若外施电压高于其临界值,输入弧柱的能量大于散出的能量,则由电子、离子和中性粒子组成的等离子体会继续加热而发生重燃,反之,若输入能量小于散出能量,则等离子体会继续冷却而不发生重燃。热重燃过程和介质重燃过程不一样,由于电流过零后,弧柱仍有一定导电性,即存在剩余电流,尽管这一电流与故障开断电流相比要小得多,根据对一模型断路器的实验,当开断电流为 10kA 时,剩余电流约为几安至几十安,并随外施电压而增大,当重燃瞬间,电流有一突跳。和介质重燃过程相比,电流过零到热重燃时间较介质重燃时间要短。

为了便于分析电弧电流过零后的击穿过程,从热击穿出发,推导一个击穿电压的数学模型。假定:

- (1) 间隙充满器壁侵蚀蒸气,它是在大气压力下的理想气体。
 - (2) 重燃电压与气体密度呈线性关系。
 - (3) 气体成分保持不变。
 - (4) 弧柱为圆柱形,以径向传导方式冷却。
- 根据能量平衡

$$\nabla(\lambda \nabla T) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3-18)$$

式中: λ 为导热系数; ρ 为气体密度; c_p 为等压比热容; T 为温度。

采用圆柱坐标, 式 (2.3-18) 的解析解为

$$\begin{aligned} T &= T_{\text{amb}} + T_0 J_0(r/\sqrt{D\tau}) e^{-t/\tau} \\ &= T_{\text{amb}} + T_0 K e^{-t/\tau} \\ D &= k_a / \rho c_p \\ K &= J_0(r/\sqrt{D\tau}) \end{aligned} \quad (2.3-19)$$

式中: T_{amb} 为环境温度; T_0 为在电流过零瞬间的气体温度; J_0 为一阶贝赛尔 (Bessel) 函数; r 为电弧等离子体半径; D 为等离子扩散系数; k_a 为平均导热系数; τ 为等离子体时间常数。

热重燃的击穿电压 U_{bd} 一般可认为与等离子体温度 T_{pla} 成反比, 即

$$U_{\text{bd}} \propto 1/T_{\text{pla}}$$

因而可得气体击穿场强 E_{bd} 与电弧过零后气体温度成反比

$$E_{\text{bd}} \propto 1/T \quad (2.3-20)$$

相似的, 可得当触头斥开时, 在环境条件下的击穿场强 E_{∞} 与环境温度 T_{amb} 成反比

$$E_{\infty} \propto 1/T_{\text{amb}} \quad (2.3-21)$$

取式 (2.3-20) 与式 (2.3-21) 的比值, 并计及式 (2.3-19) 可得

$$E_{\text{bd}} = \frac{E_{\infty}}{1 + \frac{T_0}{T_{\text{amb}}} K e^{-t/\tau}} \quad (2.3-22)$$

由于当电流过零时, $T_0 \approx 2000 \sim 4000^\circ\text{C}$, 且一般击穿时间接近 τ , 因而可认为 $\frac{T_0}{T_{\text{amb}}} K e^{-t/\tau} \gg 1$, 由此式 (2.3-22) 可写成

$$E_{\text{bd}} = \frac{E_0}{e^{-t/\tau}} \quad (2.3-23)$$

$$E_0 = E_{\infty} T_{\text{amb}} / (K T_0)$$

把上使用击穿时间 t_{bd} 和击穿电压 U_{bd} 来表示, 则式 (2.3-23) 可改写成

$$U_{\text{bd}} = U_0 e^{t_{\text{bd}}/\tau} \quad (2.3-24)$$

这样, 利用式 (2.3-24), 对复杂的重燃过程, 可用当电流过零瞬间的击穿电压 U_0 和时间常数 τ 来表示击穿过程和击穿电压 U_{bd} 。

式 (2.3-24) 是从假定间隙的压力为大气压力, 并且击穿电压与气体密度呈线性关系来推导的, 考虑到实际灭弧室压力高于大气压力, 计及气体压力, 宜于把式 (2.3-24) 写成

$$\frac{E_{\text{bd}}}{p_{\text{bd}}} = \frac{E_0}{p_0} e^{t_{\text{bd}}/\tau} \quad (2.3-25)$$

低压断路器的电压恢复过程, 根据对塑壳断路器的大量实验, 获得在不同开断回路条件和不同断路器灭弧室尺寸条件下瞬态恢复电压上升至峰值的时间 t_{rec} 与灭弧室内的电弧能量 W_q 的关系如图 2.3-45 所示, 由图可见, 恢复时间 t_{rec} 在 $50 \sim 700 \mu\text{s}$ 之间, 它决定于回路功率因数、电流过零瞬间灭弧室内电子密度和限流电流过零瞬间的角度等因素。

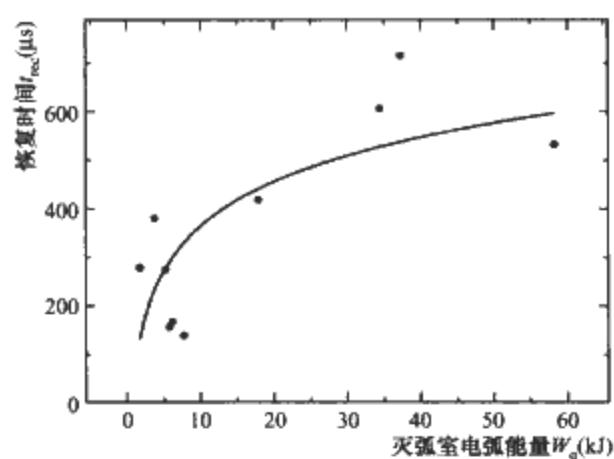


图 2.3-45 电压恢复时间与灭弧室电弧能量的关系

5.2 介质恢复强度的测量方法

在开关电器的分断过程中, 电弧电流过零后的弧隙介质恢复过程直接关系到在恢复电压作用下弧隙是否会再次击穿, 而引起电弧重燃。因而, 测量灭弧室过零后的介质恢复强度, 可以评价灭弧室的灭弧性能。

用来测量弧隙介质恢复强度的线路可以根据不同要求而各异, 但是其原理是相同的, 即在电弧电流过零后, 在弧隙上加上探测电压, 弧隙被击穿时刻和对应的击穿电压值就是这一时刻的弧隙介质恢复强度, 图 2.3-46 为弧隙介质恢复强度的一种测试线路, 这种线路由于利用间隙的多次击穿, 因而能一次试验就可获得介质恢复强度曲线, 它被称为多次击穿法。图 2.3-46 中左半部分为供给实验电流的 L 与 C 振荡电路, 图中 S 为被试开关, $S1$ 为合闸开关, 电容器组 C 与电感构成振荡回路提供电源, C_0 是用来调节试验电流过零后, 加在开关 S 弧隙上的恢复电压幅值和上升陡度的电容, R_F 是一个分流器, 用于测量电弧电流, JC 是检零触发装置, R_1 、 R_2 构成电阻分压器, 以取出电压信号, 二极管 VD 用来将试验电流过零后将试验开关 S 与振荡电路隔开, $S3$ 在电流过零后接通, 使振荡回路通过 R_3 形成一个放电回路。图 2.3-46 的右半部分为探测电压产生回路, 探测电压由一试验前充上一定电压 (一般为 $1 \sim 5 \text{ kV}$) 的电容器 C_1 提供, R 为限流电阻。

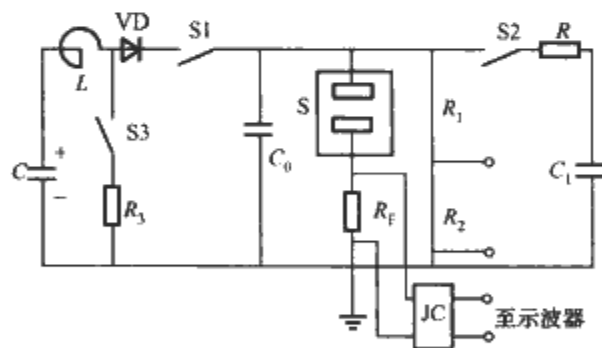


图 2.3-46 多次击穿法弧隙介质恢复强度的测试线路

测试开始时, 让 S 、 $S1$ 处于合闸位置, 试验电流流经被试验开关 S , 然后快速使 S 分开, 或用熔丝引弧, 当电弧电流过零瞬间, 由 JC 检零后发出控制脉冲, 使 $S1$ 打开, $S2$ 、 $S3$ 接通, $S1$ 打开使通过被试开关 S 的电流截止, 并且由于 $S3$ 的接通, 电源向 R_3 放电, $S2$ 在过零瞬间接通, 使 C_1 上探测电压加于试品触头间隙上, 弧隙上探测电压 U_r 近似按照直线规律上升, 如图 2.3-47 所示。当 $t=t_1$ 时, $U_r=U_{\text{bd}}$, 则间隙被击穿, 获得介质恢复强度的第一个点, 然后, 随着触头两端电容 C_0 通过弧隙逐渐放掉其积累的电荷, U_r 逐步下降到零, 由于限流电阻 R 的数值很大 ($10 \text{ k}\Omega$ 以上), C_0 很小 (几千个微法), 弧隙击穿后流过的电流很小, 不足以

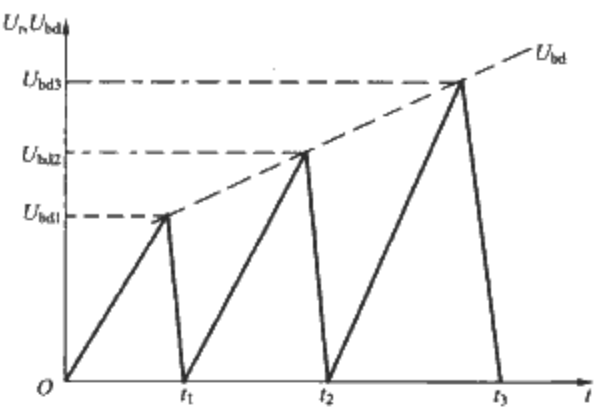


图 2.3-47 多次击穿法的电压波形

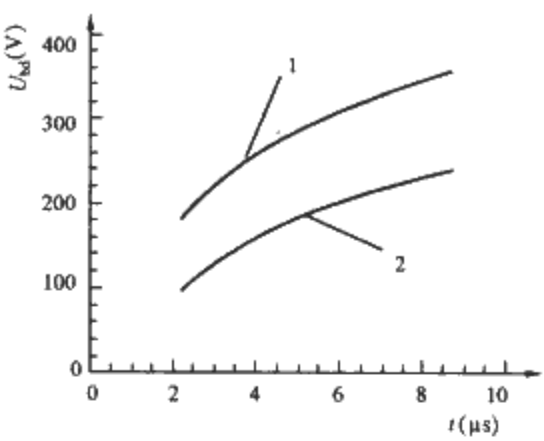


图 2.3-50 开断电流为 380A，不同铁片厚度时栅片间介质恢复强度
1— $h_s=2\text{mm}$ ；2— $h_s=1.6\text{mm}$

度也高，这会加强阴极的热电子发射，使阴极起始电流密度增大，而使鞘层的击穿电压降低，也即弧隙介质恢复强度降低。同样增加铁片厚度，实际上增强了铁片承受电流的能力，电流过零后，弧根热量可以通过周围温度低的铁片散出，使阴极的温度降低，因而鞘层的击穿电压也增高了。

两铁片间燃烧的电弧，随着开断电流的增大，其零后重燃过程也呈现不同形式。图 2.3-51 分别选取了开断电流 (A) 为 90，160，500 三种电流下的两铁片间重燃过程波形。由图 2.3-51 中可以看出，随着电流的增大，零休时间

5.3 不同开断电流和栅片厚度的介质恢复和重燃过程

交流低压断路器和接触器利用栅片分割电弧成短弧进行

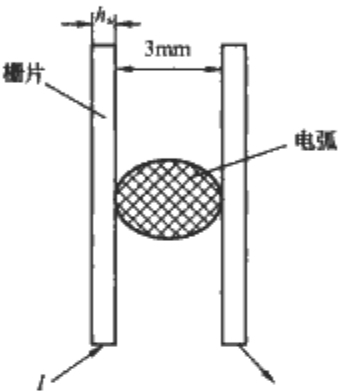


图 2.3-48 简单栅片模型

灭弧，为了研究栅片间电弧间隙介质恢复过程，设计了一个简化的栅片模型，如图 2.3-48 所示，栅片厚度分别取 2mm 和 1.6mm，栅片间距为 3mm，在三种电流 (A) 为 240，380，600 条件下，以熔丝引弧，用图 2.3-47 的线路测量栅片模型的介质恢复强度和重燃过程。

图 2.3-49 是该模型在栅片厚度取 $h_s=1.6\text{mm}$ 时，三种电流 (A) 240，380，600 条件下测得的介质强度曲线，由图 2.3-49 中可以看到，随着电流的增大，弧隙的介质强度恢复的越慢，其 U_{bd} 值也越低。

改变栅片厚度，在厚度分别为 1.6mm 和 2mm 条件下，当试验电流取 380A 时，得到的介质恢复强度曲线如图 2.3-50 所示，可看出，厚度 2mm 的栅片，介质恢复曲线较厚度 1.6mm 的栅片曲线大为提高，曲线整体提高 100V 左右。

由图 2.3-49 和图 2.3-50 的测试结果来看，随着开断电流增大，栅片厚度变薄，介质恢复电压 U_{bd} 降低。由电弧理论可知，交流电弧过零瞬间的起始介质强度决定于鞘层或近阴极作用，而鞘层的击穿电压与电极温度有密切关系，燃弧期间，电弧对栅片强烈的加热，这会影响当电流过零瞬间电极的温度，开断电流大，开断电弧功率高，过零瞬间阴极温

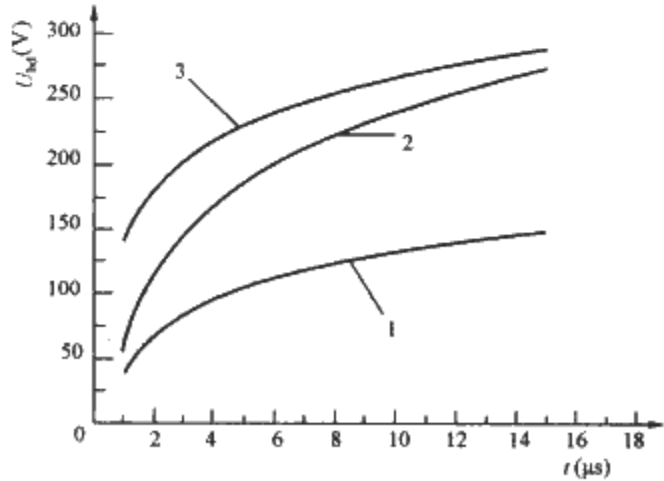
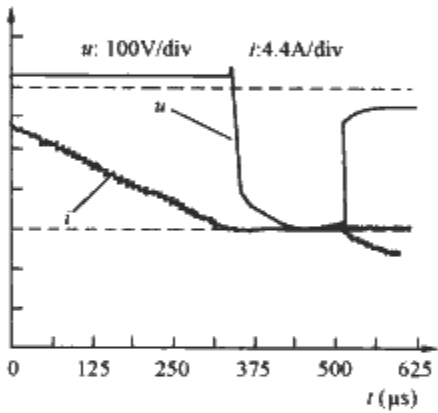
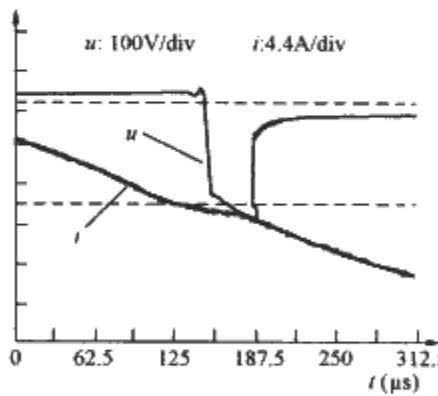


图 2.3-49 不同电流时，栅片间介质恢复强度，铁片厚度为 1.6mm

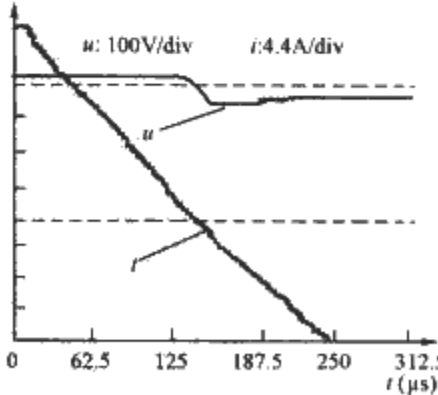
1— $I_p=600\text{A}$ ；2— $I_p=380\text{A}$ ；3— $I_p=240\text{A}$



(a)



(b)



(c)

图 2.3-51 两铁片间在不同开断电流下的电流过零后重燃过程

(a) 开断电流 90A；(b) 开断电流 160A；(c) 开断电流 500A

越来越短，90A 时，电流零休时间可达上百个微秒。而在 500A 时，电流与电压同时过零，电流没有零休时间，弧隙的击穿则呈现出明显的热击穿特征。与电流过零的特征相对应，弧隙击穿的形式也不同，在小电流时，击穿电压在很长一段时间内保持较高值，而在大电流时，击穿电压很低，并且过零后很快转变为电弧电压。

5.4 产气材料与灭弧室出气口尺寸对介质恢复过程的影响

在第 3.3 节中介绍了利用产气材料实现气吹灭弧的机理，放置在灭弧室内的产气材料在电弧作用下产气，产生的气体提高了灭弧室压力，促进气体流动而冷却电弧，并且有助于驱动电弧进入栅片，因而采用产气材料产气可提高电弧电压，增大断路器限流性能。另一方面，产气材料同样对提高电弧电流过零后的介质恢复强度有显著作用。考虑到电流过零瞬间弧隙的温度在 3000~5000℃ 之间，因而选择的产气材料，应该是产生的气体在这一温度段中有良好的导热性能，并要求它的介质强度能超过开断回路的恢复电压。电流过零以后，让灭弧室内高温的游离态气体尽可能排出灭弧室可以提高过零后的介质恢复强度。美国 Cutler Hammer 公司的 J. J. Shea 用一个模型灭弧室，研究了不同产气材料和灭弧室出气口面积的介质恢复强度。

模型灭弧室的结构如图 2.3-52 所示，设计的尺寸近似小功率塑壳断路器的灭弧室，云母玻璃陶瓷制作外壳，前后两侧可放置各种绝缘材料，外壳左侧开出气口，出气口大小可以改变，触头系统的导入和导出板设计成能消除触头系统的自励磁场，使电弧稳定在触头上燃烧，动静触头材料用银钨 AgW，触头间隙为 1.6mm，用一快速螺管电磁铁操作动触头，其打开速度为 4.1m/s，灭弧室体积为 80cm³，出气口面积为 0.5cm²。实验电流由振荡回路提供，开断电流峰值为 12kA。在上述条件下，采用陶瓷、POM（聚甲醛）和尼龙 6/6（聚酰胺）作为两侧绝缘材料，前者为不产气材料，后两者为产气的热塑性材料，采用双电源法线路测试侧壁设置三种不同绝缘材料的介质恢复强度，测试结果见图 2.3-53。

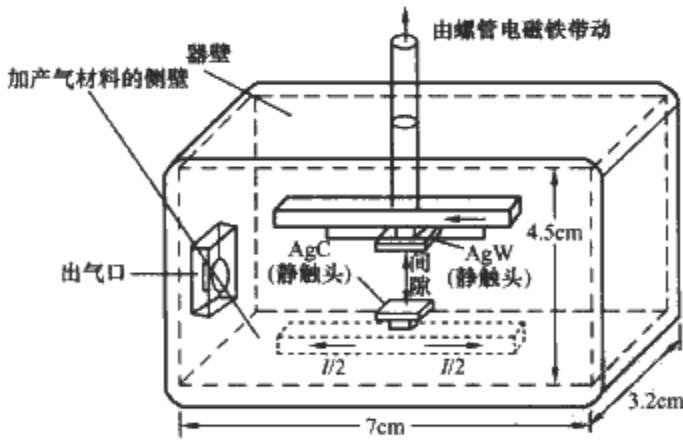


图 2.3-52 用于测量介质强度的模型灭弧室

表 2.3-1 由实测结果获得的
三种侧壁绝缘材料的参数 U_0 和 τ

材 料	U_0 (V)	τ (ms)
陶瓷	307	3.36
POM	290	1.05
尼龙 6/6	145	0.79

所获得的曲线在 U_{bd} 为 1000V 以下比较接近直线，因而可用一定斜率的直线来逼近，如图 2.3-53 所示的虚线。若用式 (2.3-24) 来表示介质恢复特征，则此直线斜率即表示介质恢复过程时间常数 τ ，对图 2.3-53 中三条曲线的 U_0 和

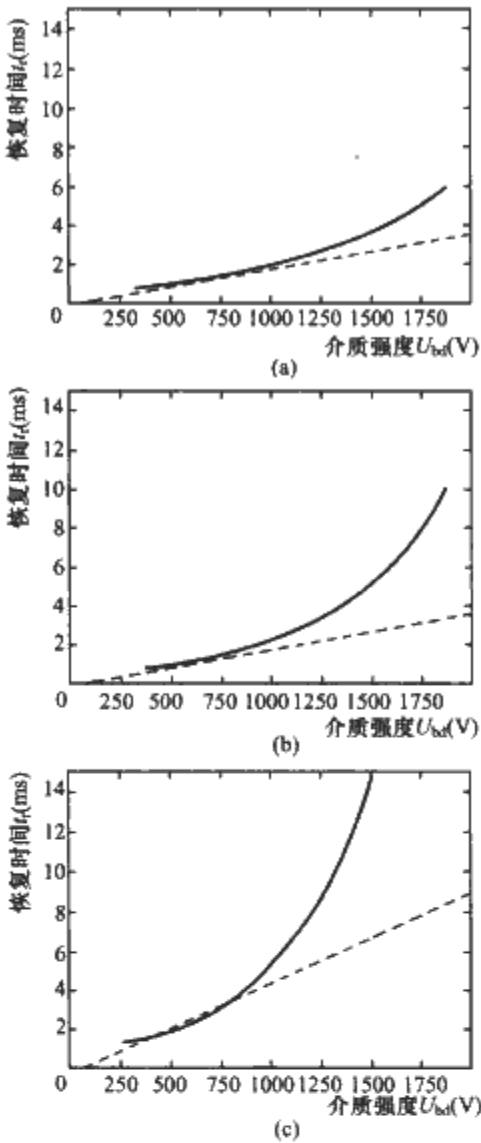


图 2.3-53 三种器壁绝缘材料的介质恢复特性
(a) 尼龙 6/6; (b) POM; (c) 陶瓷

τ 可列表如表 2.3-1 所示，由表 2.3-1 和图 2.3-53 可以看出，尼龙 6/6 和 POM 为产气材料，因而介质恢复较快，而陶瓷介质恢复较慢。同为产气材料，尽管尼龙 6/6 的 U_0 较低，但由于时间常数 τ 最小，因而介质恢复最快。产气材料所以能获得电弧电流过零后较快增长的介质恢复过程，是由于产气材料使灭弧室压力增加，促进了气流的冷却作用。但采用产气材料作为器壁，在灭弧室经过多次开断操作后，分解的碳粒子会沉积在器壁表面，而影响产气材料的作用，使灭弧室压力降低，产气材料的作用减弱。其次，触头材料也会影响介质恢复。低压断路器普遍采用银钨触头，开始操作时，由于触头表面银的成分较多，开断中银的蒸气较浓，因而会使击穿电压降低，多次操作后，表面银含量减少，而钨是耐熔金属，因而银的蒸气减少，这会使介质恢复强度提高。

产气绝缘材料的选择应注意产生的气体中的含氢量，因为氢气的导热性最好，因而可获得最高的介质恢复强度。表 2.3-2 为 600A 的电弧在不同气体介质中恢复强度的对比。由表可见，氮、二氧化碳、氧气和氢气的电流过零后初始介质恢复强度都较空气为高，而氢气的初始介质恢复强度和介质恢复速度都远较其他气体为高。

表 2.3-2 600A 电弧的各种气体介质恢复强度对比

气体类型	电弧过零瞬间的初始恢复强度 (V/cm)	介质恢复速度 (V/cm/100 μ s)
空气	70	13
氮	115	26
二氧化碳	145	25
氧	170	7
氢	310	70

表 2.3-3 为几种产气材料的组分和含氢量，其中 POM12（聚酰胺）的含氢量最多。

表 2.3-3 几种产气材料的组分

产气材料	H	C	N	O
纤维填充的三聚氰胺	44%	29%	21%	6%
聚酰胺 (POM12)	62%	32%	3%	3%
不饱和聚酯	42%	33%		25%

采用同一个实验模型，动触头用银钨 AgW，静触头用银石墨 AgC，器壁两侧不放置绝缘材料。在开断电流（kA）分别为 3，10，15 条件下，改变出气口直径 d_h （mm）为 3.2，6.4，12.7，测量不同出气口尺寸对介质恢复过程的影响。

测量结果见图 2.3-54 和图 2.3-55，图 2.3-54 表示开断电流为 15kA 时不同出气口直径 d_h 的介质恢复过程 $E_{bd}/P_{bd}=f(t_{bd})$ ，纵坐标取 E_{bd}/P_{bd} 是按照式（2.3-25）要求来绘制的，由图 2.3-54 中可以看出，在同一开断电流下，出气口的直径越大，电流过零后，游离气体可从出气口逸出，有利于电弧冷却，因而介质恢复过程的曲线越高。

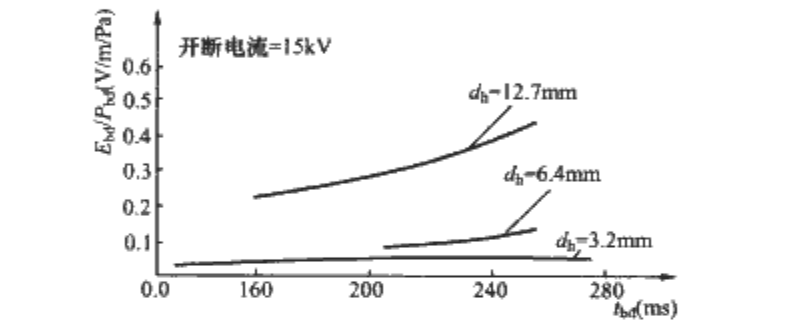


图 2.3-54 开断电流为 15kA 时，不同出气口直径的介质恢复过程

由图 2.3-55 的曲线得出，当开断为 15kA 时，出气口直径 d_h 为 12.7mm 的恢复强度 U_{bd} 较 6.4mm 直径的高上近一倍，但出气口尺寸也有一定限度，当出气口尺寸过大时，灭弧室内压力降低，反而不利于气吹作用，另外，还容易造成电弧在出气口喷出后引起相间短路。

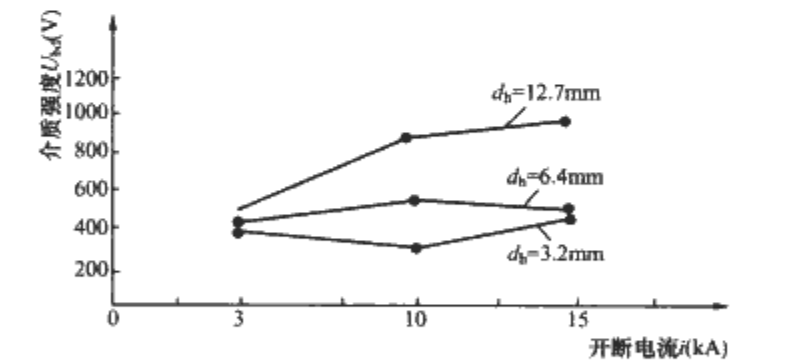


图 2.3-55 不同出气口直径 d_h 和不同开断电流的介质强度

6 开关电弧的现代测试技术与灭弧室的优化设计

6.1 低压灭弧系统研发新技术

由于电弧数学模型，特别是能反映电弧微观性态的磁流体动力学电弧动态数学模型（MHD 模型），目前只能描述简单灭弧室内电弧，尚不能与电路瞬态和机械运动方程相耦合，因而低压电器灭弧室的设计和开发还不能离开样机的试验和经验。为了减小短路试验次数，降低开发成本和周期，近年来国内外正在建立一种崭新的研发技术，它采用振荡回

路为电源，依靠现代测试技术，对可拆式模型灭弧室的各种物理性能参数的测量，来代替传统的制作正规样机，在短路试验站进行大量试验的研发方法。

振荡回路利用电容器组的放电产生冲击电流，消耗能量少，设备使用方便。可拆式灭弧室是一种可改变结构型式和几何参数的模型灭弧室，例如对低压断路器来说，一个理想的可拆式灭弧室应能改变灭弧室栅片的片数、布置的方式和位置、出气孔的大小，以及器壁产气材料的品种等参数，以便通过试验确定其最佳值。传统的短路开断试验，一般仅测量电弧电压和电流波形，这些信息远远不能判断一个试验样机的灭弧性能。依靠现代测试手段（例如：利用数字式快速摄像机可以记录电弧在灭弧室内的运动图像，观察电弧是否顺利进入灭弧栅片，是否有电弧背后击穿现象，利用压力传感器可以测量开断过程中灭弧室的压力；利用光谱分析仪可以测量电弧的温度，器壁产气材料在燃弧期间产生气体的成分），通过测量灭弧室在开断过程中各种物理参数的变化，才能深入掌握所设计开发的灭弧室性能，以便进行改进和提高，实现灭弧室的优化设计。

由于减少了短路试验和正规样机制作次数，不但降低了研发成本、缩短了研发周期，并且节约电能。考虑到节能环保，所以这种研发技术被称为环保设计技术（Design for the environment）。

6.2 单频振荡回路和各种传感器

进行开关电弧和低压断路器灭弧室的研发离不开实验测试，采用产品型式试验的方法以短路试验站作为电源要消耗大量的能量，并且要控制合闸相位比较困难，测试的电流和电压波形信息量太少，不利于正确判断开关电弧灭弧室的实际性能，以振荡回路为电源对灭弧系统的研发则能带来诸多方便。单频振荡回路是充电的电容器，通过 LC 回路放电提供 50Hz 的试验电流，这种设备使用方便并且节能，其基本结构如图 2.3-56 所示。其工作原理是：实验前主合闸开关 S2 断开，充电开关 S1 闭合，交流电源经过调压器 T 升压后，通过整流桥 B 对电容器组 C 充电；充电至所需实验电压后断开 S1，实验准备就绪。实验时接通主合闸开关 S2，由电容器组 C、电感 L、试品 SP、分流器 F 构成一个典型的单频振荡回路。C、L 的固有参数决定了其振荡频率为 50Hz，即当 S2 合闸，就开始有频率为 50Hz 的振荡衰减电流通过试品。其预期短路电流的大小决定于充电电压。

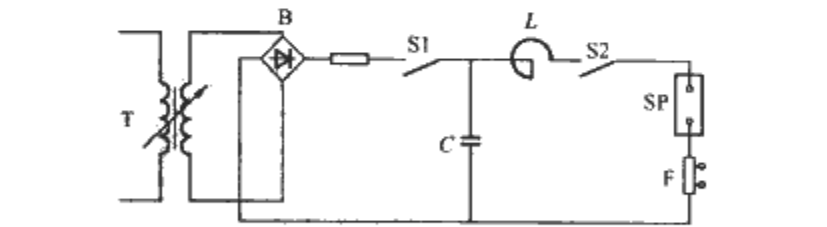


图 2.3-56 单频振荡回路

可拆式灭弧室不同于实际断路器的灭弧室，它的结构参数、灭弧栅片形状和数目等都可以方便地改变，这样有利于减少样机制作次数和工作量。测试仪器方面，为了获得开断过程各种参数，需要用电流和电压传感器测试电弧电流和电弧电压，电流传感器一般用专用低感分流器，电压传感器可用高压探头，这是一种具有高阻隔离功能的上千倍电压衰减器，如 Tektronix6015A 探头，将其输入侧直接与试品两个电极相连，即可在输出侧得到经过衰减的电弧电压信号。灭弧室压力的测量可用压电式气压传感器，例如 MPM480 型传感器，该传感器使用 15~24V 的直流电源，在 0~500kPa

的测量范围内具有良好的线性度，输出范围是 0~5V。测量断路器操动机构主轴转动过程及动触头的位移需要用位移或转角传感器，例如 WDD35D 系列高精度导电塑料电位器可用于测量机械转角，其标称阻值为 1~10kΩ，可测 360° 转角。WDL 系列直滑式导电塑料电位器可用于测量最大值由 31~306mm 的位移，其阻值为 1~10 kΩ。

6.3 灭弧室内电弧运动的测量

低压开关电器的开断性能很大程度取决于开断过程中电弧在灭弧室中的运动，以及电弧能否顺利进入灭弧栅片，因而观察和记录电弧在灭弧室内的运动至关重要。目前有两种方法可以记录和拍摄灭弧室中的运动情况，它们是 CCD 数字式高速摄像机和二维光纤高速测试系统。CCD 数字式高速摄像机拍摄灭弧室内电弧运动要在断路器外壳上开较大的观察窗，对断路器结构造成较大的破坏，影响断路器的开断性能，CCD 高速摄像机的拍摄速度一般为 10⁴ 幅/s。而光纤测试系统可将光纤插入灭弧室内，对断路器影响较小，其拍摄速度可达 10⁶ 幅/s。这里重点介绍由西安交通大学研制的带自聚焦透镜的二维光纤阵列电弧运动测试系统，如图 2.3-57 所示。

系统由多路光纤组成的探头、信号处理系统和后处理计算机及其专用软件组成。光纤探头以二维阵列方式布置，并插入被观察的灭弧室内，以测量电弧的光信号。为了提高测量精度，在每根光纤顶端加装一自聚焦透镜，使它与普通光纤比，可获得小得多的观察发散角度。

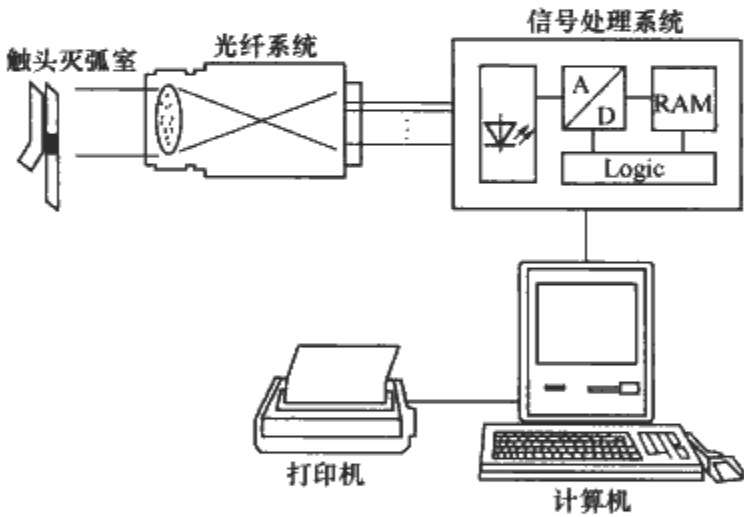


图 2.3-57 光电测试系统

系统利用光纤将测试点光照强度传送至以光电转换元件为核心构成的转换电路，由该电路将光照强度信号转换为与之对应的电压信号，经过 AD 转换后将各测试点光照强度随时间的变化情况保存，并在实验结束后将相应数据通过 RS232 串行通信口送至计算机。系统软件根据测试数据，用 8 种亮度不同的颜色表示对应的光照强度，根据需要将测量区域内各点的光照强度随时间的变化过程以可调节的速度模拟再现出来，即可观察到整个开断过程中电弧的运动形态。

系统选择响应速度快的光敏二极管作为光电转换的核心元件。光敏二极管在反向施加一定电压的情况下，产生的反向光电流大小与其顶端采光透镜中通过的光强成正比例关系，使光电流通过一个采样电阻形成电压信号并经过线性放大，即得到可用于 AD 转换的电平信号。图 2.3-58 为光电信号的采集与放大原理。

系统带有 4 个模拟通道，以采样频率为 15.625kHz、12 位 AD 转换精度采集与整个拍摄过程同步的相关物理量的波形，它们可以是电弧电流、电压、灭弧室压力及动触头支架

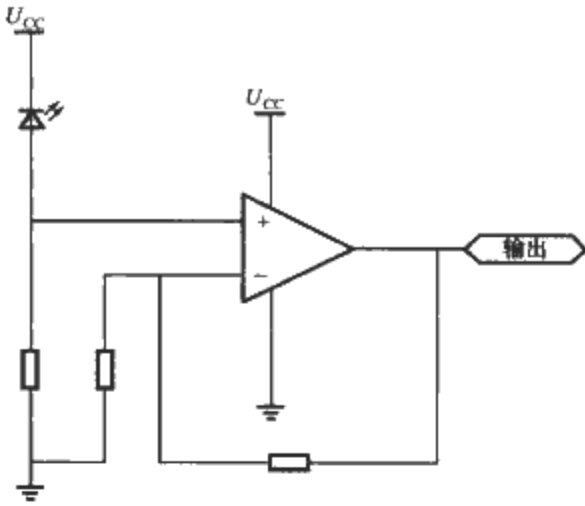


图 2.3-58 光电信号的采集与放大原理

的角位移等。

系统软件在 Windows 操作系统下用 VC++ 语言开发，软件具有图形组态功能，用户可方便地在显示器屏幕上绘制和编辑触头灭弧室系统的平面图形以及光纤的位置，通过属性的设置，使其能够正确地反映实际的试验过程。在图形输入方面，软件系统提供标准图形文件 DXF 接口，即可以读入 AutoCAD 等绘图软件的图形文件。

用于观察电弧运动的光纤安装方法如图 2.3-59 所示。观察孔均选择在栅片之间的投影位置，观察孔直径应小于栅片间距，并由 MCCB 的外壳一直穿透灭弧室侧板，这样才能观察到灭弧室内部栅片之间电弧的运动情况。所有的观察孔构成网格状排列，观察区域覆盖整个触头与灭弧室在侧壁的投影区域，即可观察到电弧的运动全貌。为避免电弧的高温损坏光纤前端的自适应聚焦透镜和光纤本身，光纤并不插入观察孔，而是在光纤顶端的纤维透镜与 MCCB 侧壁之间安装一层透明的有机玻璃板，电弧光由透明有机玻璃板透出后通过透镜聚焦进入光纤。有机玻璃板外侧是活动光纤的定位模板，该模板是在绝缘板材上与观察孔分布完全相同的位置开设与光纤端部直径一致的定位通孔而成的，实验时将光纤插入定位孔，使其顶端的纤维透镜能够与相应的观察孔垂直正对。

以下以塑壳断路器灭弧室优化设计的两个例子来说明这种低压灭弧系统的现代研发技术。

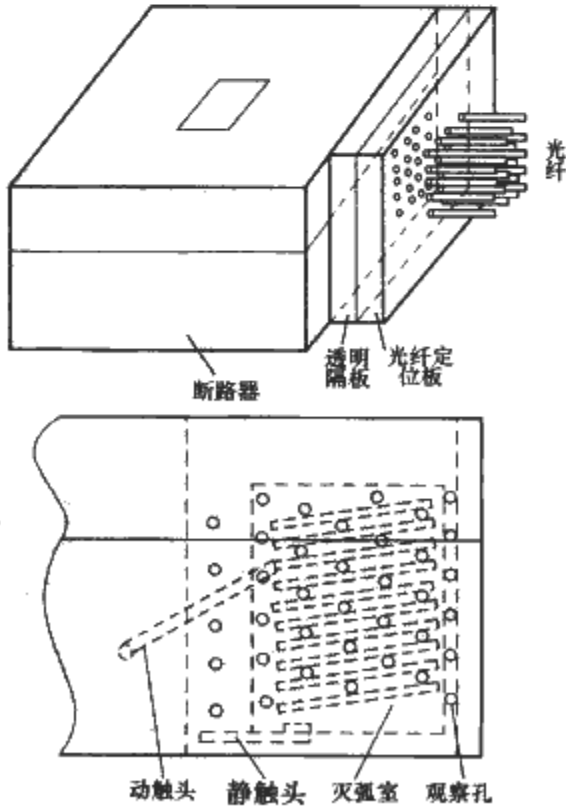


图 2.3-59 实验中光纤的安装方法

6.4 电极与灭弧室栅片间距离优化选择

塑壳断路器的限流性能决定于开断过程中达到的电弧电压最大值，电弧电压越高限流开断性能越好。电弧电压由弧柱压降和分割成短弧的近极压降两部分组成，电极与栅片间距离不但与电弧拉长的长度，也即与开断过程中弧柱压降有关，并且也与电弧进入栅片分割成短弧的数目有关，因而优化选择电极与栅片间距离可提高断路器的开断特性。

试验研究在振荡回路上进行，如图 2.3-60 (a) 所示。由于低压电器的开断试验是在低压大电流条件下进行，因而振荡回路主回路通过一降压变压器向模型灭弧室供电，变压器变比为 3000/210，模型灭弧室的电极采用 AgW 触头，直径为 8.5mm，二电极之间距离为 30mm，共采用 5 片栅片，栅片厚度 2mm，栅片与电极之间距离 D 可改变，见图 2.3-60 (b)，分别取 $D = 20\text{mm}$ ， 30mm ， 40mm ， 50mm ， 60mm 。为了测定电弧进入栅片情况，用拍摄速度为 18 000 幅/s 的 CCD 高速数字摄像机，依靠 4 面镜面反射在两个方向记录电弧的运动，如图 2.3-61 所示。试验由接在电极两

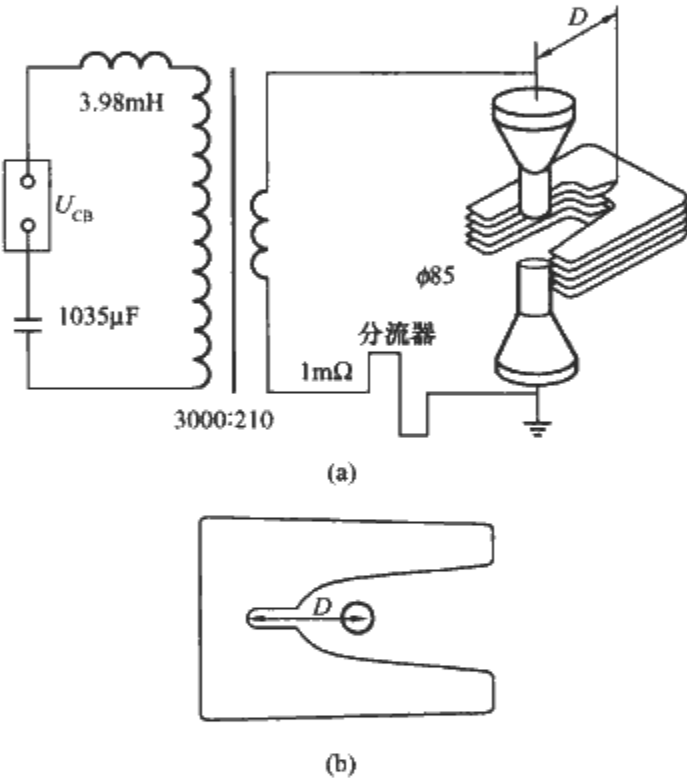


图 2.3-60 电极与灭弧室栅片间距离优化选择
(a) 试验用振荡回路；(b) 栅片的安排

端的熔丝起弧，当瞬时开断电流为 4kA 时，测得的实验结果如图 2.3-62 所示，图中画剖面线部分表示多次试验的偏差，图 2.3-62 (a) 为电极距离 D 与电弧长度的关系，当 $D=50\text{mm}$ 时，电弧可拉得最长，这表示当 $D=50\text{mm}$ 时，电弧的弧柱电压

U_l 为最高。图 2.3-62 (b) 为 D 与短弧分割数的关系，尽管总的栅片数为 5，但随着 D 的变化，进入栅片并被分割成短弧的数目却不同，在 $D=20\text{mm}$ 时，分割的短弧数最多，也即这时的短弧电压最高，但总的电弧电压是两者之和，其最大值出现在 $D=30\text{mm}$ ，如图 2.3-62 (c) 所示。这也说明选择灭弧室的最佳参数，应同时考虑弧柱和短弧电压两者的作用。

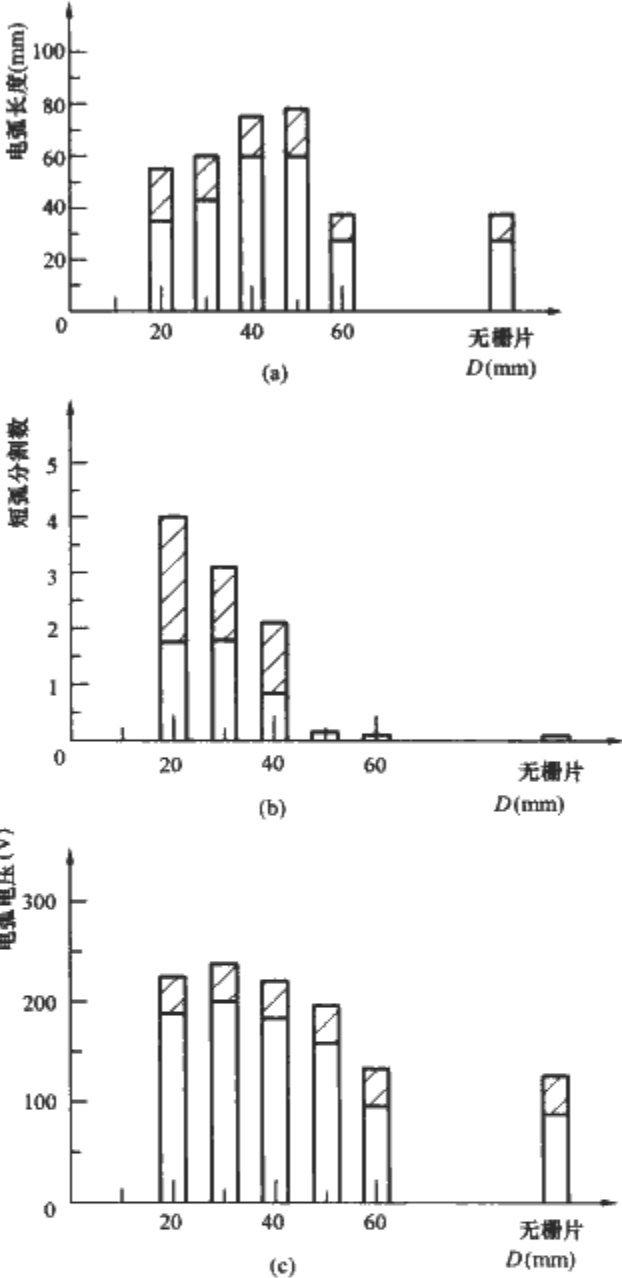


图 2.3-62 当瞬时开断电流为 4kA 时，
电极距离 D 对电弧参数的作用
(a) 电弧长度；(b) 短弧分割数；(c) 电弧电压

6.5 用引弧板改进灭弧室的开断性能

研究对象为一旋转式双断口结构的塑壳断路器，每个灭弧室中有平行排列的形状相同的 7 片灭弧栅片，栅片形状如图 2.3-63 (a) 所示。由于设计上的不合理，当动触头处于打开位置时候，动触头离最上方一片灭弧栅片距离较远，电弧不能顺利进入位置靠上的几个栅片间隙。为解决这一问题，加工了一个加长的、不带栅片腿的栅片作为引弧板，使电弧容易进入上方几个栅片间隙，加长的引弧板形状如图

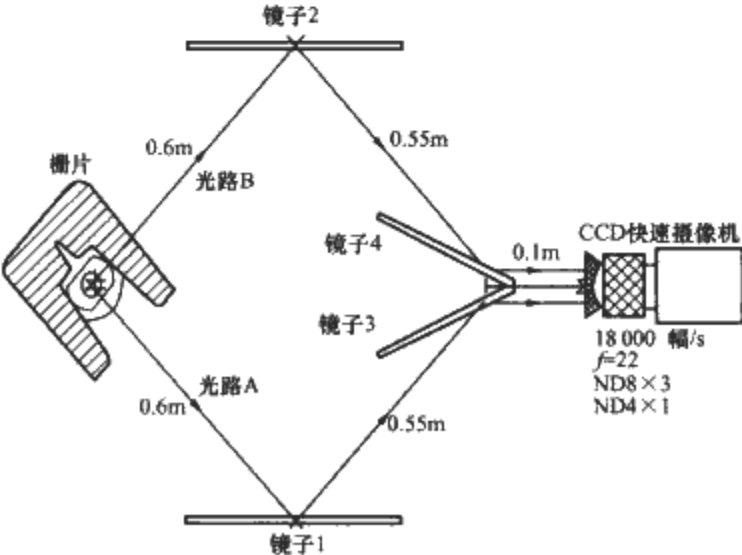


图 2.3-61 快速摄像机在两个方向观察电弧

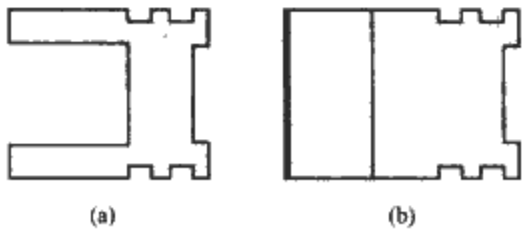


图 2.3-63 栅片及引弧板形状
(a) 原栅片形状；(b) 引弧板形状

2.3-63 (b) 所示, 将其替换到原来最上方一片栅片的安装位置如图 2.3-64 所示。改装前后分别对 10kA (有效值) 预期短路电流进行开断, 通过观察开断过程, 比较加装引弧板前后对电弧进入栅片的情况及开断性能的影响。

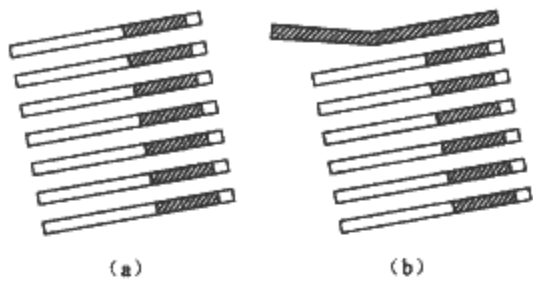


图 2.3-64 加装引弧板前后栅片排列情况对比
(a) 改装前的栅片排列; (b) 改装后的栅片排列

采用上面介绍的二维光纤阵列电弧运动测试系统来观察灭弧室内电弧运动情况。用于观察电弧运动的光纤安装方法如图 2.3-65 所示。观察孔均选择在栅片之间的投影位置, 观察孔直径应小于栅片间距, 并由塑壳断路器的外壳一直穿透灭弧室侧板, 这样才能观察到灭弧室内部栅片之间电弧的运动情况。观察区域覆盖整个触头与灭弧室在侧壁的投影区域, 即可观察到电弧的运动全貌。

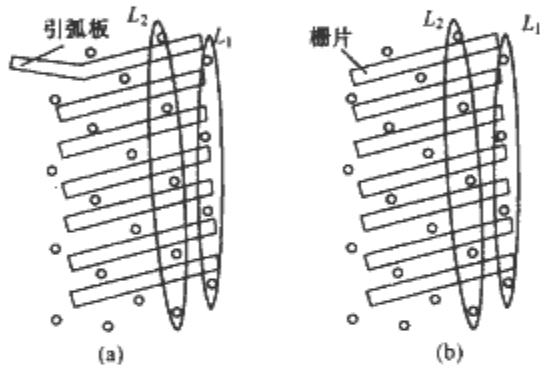


图 2.3-65 光纤观察点位置及 L_1 、 L_2 的定义
(a) CB1 加引弧板; (b) CB1 原栅片排列

为便于比较电弧进入栅片的情况, 定义某一系列光纤信号的亮度 L 为: 在一次开断过程中, 从起始瞬间 t_0 到燃弧结束 t , 该列各光纤传感器采集到的电弧光亮度对时间积分的

总和 ($L = \sum \int_{t_0}^t A dt$), 这里的 A 为亮度, 与 3 位转换精度相对应, 数值为 0~7 的整数。按照上述定义的 L , 与实验模型光纤观察孔位置相对应, 可认为图 2.3-65 中从右往左第一列和第二列光纤的亮度最能反映电弧进入栅片的情况, 该两列的亮度越大, 表明电弧进入栅片的部分越多, 其中第一列的亮度 L_1 比第二列的亮度 L_2 更能表明电弧进入栅片的深度。表 2.3-4 给出了两种测试条件下的实验结果。

表 2.3-4 实验结果数据统计

样品型号 实验条件	电流 峰值 (kA)	电压 峰值 (V)	开断 时间 (ms)	压差 峰值 ($\times 10^2$ Pa)	L_1	L_2
CB1 无引弧板	10.49	393	9.9	486	3327	18 932
CB1 有引弧板	8.943	443	9.8	578	19 188	28 608

图 2.3-66 给出了 CB1 中引弧板对电弧进入栅片情况及电弧电压、灭弧室气压的影响。

对加装引弧板前后的实验结果表明, 加装引弧板后, 在其他条件相同的情况下, L_1 值和 L_2 值都较无引弧板要高, 特别是第一列的亮度 L_1 更是高得多, 这表示电弧进入栅片的情况大幅度改善。相应地, 电弧电压峰值 U_m 也提高了, 进而引起电流峰值下降、开断时间缩短, 由于电源输入电弧间隙的能量增加, 灭弧室内外最大压力差 p_m 也提高了。上述测试表明引弧板的使用, 改善了断路器的开断性能。

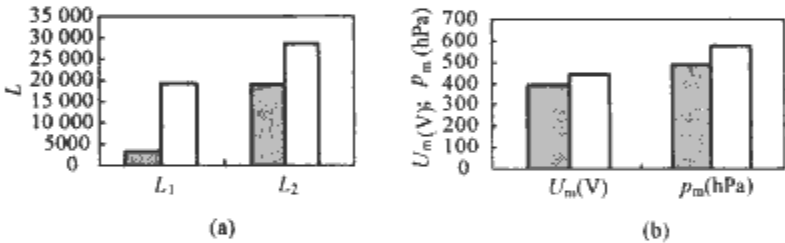


图 2.3-66 引弧板对 L_1 、 L_2 、 U_m 、 p_m 的影响
(a) 有、无引弧板时, 光纤亮度 L_1 与 L_2 的对比; (b) 有、无引弧板时, 电弧电压 U_m 与灭弧室压力差 p_m 的对比
■ —CB1 无引弧板; □ CB1—有引弧板

第4章 低压电器的虚拟样机技术

1 概述

1.1 虚拟样机技术的概念

虚拟样机技术属于科学计算可视化 (Visualization in Scientific Computing) 技术范畴, 科学计算可视化技术简称可视化仿真。20 世纪 80 年代末, 美国科学基金会在华盛顿召开的一次会议上提出“将图形和图像技术应用于科学计算是一个全新的领域”, 并把这种技术命名为科学计算可视化。它是涉及计算机图像学、图形处理、计算机辅助设计、计算机视觉及人机交互技术等多个领域的一个崭新的技术领域。在工程设计方面, 可视化仿真定义为对科学计算或仿真计算所获得的数据进行可视化加工或三维图形和动画显示, 并可通过交互地改变参数来观察计算结果的全貌及其变化。由于可视化仿真对各门学科和工程技术发展有极其重要的意义和使用价值, 因而该技术在它一开始出现就得到人们的极大重视。

计算机用于数值计算已有 50 年历史。长期以来, 由于计算机软硬件技术水平的限制, 数值计算只能以批处理方式, 不能用图形交互方式处理。大量的输入和输出数据采用人工处理, 不仅十分繁琐, 所花费时间往往是计算时间的十几倍甚至几十倍, 并且不能得到有关计算结果直观形象的整体概念, 且可能丢失大量信息。例如, 20 世纪 70~80 年代的有限元分析软件, 前后处理工作十分繁琐, 进行一台大型变压器的电场分析, 输入各零部件的三维几何尺寸等原始数据进行自动剖分, 一般需要几天甚至几个星期的艰苦劳动。因而改进科学计算输入数据的前处理和计算结果的后处理已经成为提高科学计算质量和效率的主要问题之一。

实现科学计算的可视化具有多方面的意义: 它可以大大加快数据的处理速度, 使庞大的数据得到有效的利用; 能把不能或不易观察到的工程现象变为使人们能观察到的现象, 进一步发现并理解被设计和被研究对象所产生的物理机理, 从而提出改进设计的具体措施; 可以实现对计算过程的引导和控制, 通过图形交互手段可方便快速地改变设计和计算的原始数据和条件, 并通过三维图形或动画来显示和观察改变原始数据后对研究对象基本特性的影响, 来达到对象优化设计的目的。

低压电器的设计要对设计对象进行电气和机械性能的计算和仿真。例如: 通过温度场计算确定产品的热特性; 通过各零部件的应力分析检查零部件强度; 通过断路器机构运动过程的动态分析模拟机构的动特性; 通过电磁场计算确定脱扣器或操作电磁铁的静态和动态特性等。如能将数值计算或仿真和计算机三维图形技术相结合, 即采用可视化仿真, 将大大提高仿真的质量和效率。通过图形交互技术, 可改变各种设计参数, 达到优化设计的目标。

随着经济贸易的全球化, 要想在竞争日趋激烈的市场上取胜, 缩短开发周期, 提高产品质量, 降低成本以及对市场的灵活反应成为竞争者们所追求的目标。传统的低压电器设

计, 首先是通过调研确定初步设计方案, 然后依靠简单的经验公式作产品的设计计算, 由于这种设计对最终产品的性能把握不大, 所以必须通过样机制作和试验验证才能最后确定设计方案。当通过试验发现缺陷时要回过头来修改设计, 再制作新的样机, 这样通过反复样机制作和试验, 最终产品才能达到要求和性能, 并且最终的设计并不是最优的。传统设计由于主要依靠物理样机的制作和试验验证, 所以设计周期长, 成本高, 更不用提对市场的灵活反应了。

虚拟样机技术是从分析解决产品性能及实现优化设计目标出发, 是一种克服传统设计方法弊端的高新技术。依靠这一技术, 设计人员可以直接利用三维图形技术在计算机提供的虚拟环境中建立设计对象的三维虚拟样机, 利用可视化仿真软件真实地模拟样机的各种物理性能, 快速分析各种设计方案, 进行物理样机难以进行或根本无法进行的试验, 直到获得最佳设计方案。另外设计人员可以把自己的经验和想象综合在虚拟样机中, 充分发挥设计人员的创造力。用虚拟样机技术来代替传统的设计技术, 不但可缩短开发周期, 并且设计质量和效率都得到大幅度提高。

1.2 虚拟样机技术在低压电器中的应用

由于虚拟样机技术的先进性, 近年来国际上各著名电气公司纷纷建立研发新系列产品的专用仿真系统。例如, 金钟-默勒公司用于研发低压断路器的仿真系统如图 2.4-1 所示, 该系统被称为 USAM, 它由三个模块组成, 分别建立于三个商品仿真软件, 它们是: 多体动力学仿真软件为基础的断路器机构仿真模块; 以 ANSYS 仿真软件为基础的磁场仿真模块, 用于触头系统磁场计算和瞬时脱扣器仿真; 以流体动力学仿真软件 (CFX-F3D) 为基础的开关电弧仿真模块。把这三部分仿真与电路瞬态方程综合起来, 即形成塑壳断路器开断过程仿真系统。图 2.4-1 中待定系数是用于建立一个开断过程简化的黑盒模型。

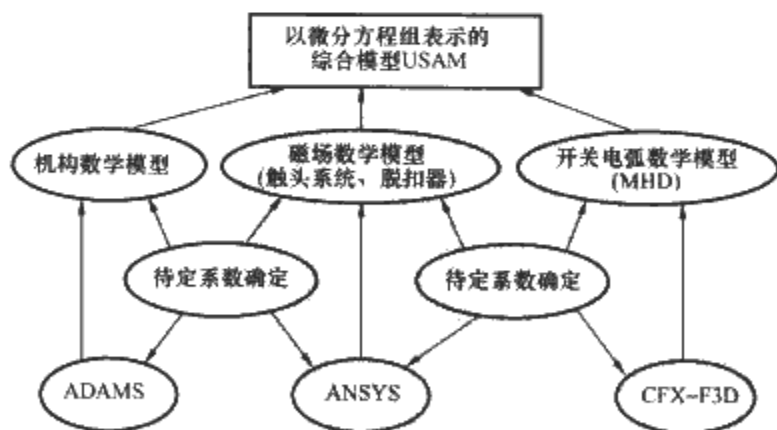


图 2.4-1 金钟-默勒公司研发低压断路器的仿真系统

又如日本富士公司建立了用于开发接触器的仿真系统, 电磁接触器主要性能决定于操作电磁铁、触头和灭弧室的设计, 要研发小尺寸、节能和长寿命的高性能接触器, 如表 2.4-1 所示, 计算机仿真与优化设计起关键作用, ABB 公司在开发 Tmax 新系列塑壳断路器时也充分利用了仿真技术。

表 2.4-1 富士公司设计新系列接触器的仿真技术

	○	○	○	电磁铁	高效率电磁铁的设计	○	○	○		
	○	○	○		吸力与反力特性配合	○	○	○		
			○	触头	减小触头振动				○	
○					抗熔焊, 耐电弧侵蚀				○	
	○			灭弧室	高速电弧驱动	○			○	
○		○			灭弧室塑壳化	○	○			
新材料开发	磁场分析	应力分析	运动分析	符合国家标准: IEC, UL/CSA			小型化	质量轻	节能	长寿命
	计算机仿真与优化设计						接触器所要求性能如上			

我国在 20 世纪 70 年代末即开始研究有限元分析在电磁铁特性仿真和优化设计方面的应用, 80 年代后期和 90 年代初, 我国低压电器工厂以常熟开关厂带头, 引进了国外著名的三维 CAD 软件, 如 UG-II 和 PRO/E 等, 并迅速得到推广, 使我国低压电器产品的结构设计和制造水平有显著提高。但上述软件仅能解决零部件三维造型和装配问题, 不能保证设计的产品达到预期的性能指标, 无法发挥设计人员的创造性和想象力, 以达到优化设计的目标。进入 21 世纪, 我国加入 WTO 后, 在低压电器领域, 不但在国际市场, 由于国际大公司以独资或合资方式进入国内市场, 国内市场的竞争也日趋激烈。目前, 我国低压电器产品仍旧三代同堂, 按产值计算: 第一代产品市场占有率为 15%; 第二代产品市场占有率为 45%; 第三代产品市场占有率为 40%。第三代产品当前技术性能相当于国外 20 世纪 90 年代水平, 和国际上新一代产品在性能、可靠性以及外观质量上尚有不少差距, 因而要适应市场需要, 亟待开发高水平、有自主知识产权的新产品。要实现这一目标, 在国内推广和采用虚拟样机技术、改变传统的研发手段, 受到了国内企业和高等学校的重视, 目前, 在开关电器行业, 常熟开关厂, 镇江凯帆、上海电器科学研究所和西安高压电器研究所等已开始采用这项新技术来研发新产品。

2 三维造型与 CAD 软件

进行可视化仿真, 首先需要在计算机里建立研究对象的三维模型。商用仿真软件尽管有一定的三维造型功能, 但和三维 CAD 软件相比功能较差, 因而较好的办法就是在 CAD 软件上建立所需研究和分析的三维样机模型, 通过接口把建立好的三维模型传送到仿真软件中去。为此, 在介绍虚拟样机技术前, 首先把常用的三维 CAD 软件作一概述。

2.1 AutoCAD 系统和 UG 系统

2.1.1 AutoCAD 系统和 UG 系统的背景

AutoCAD 软件是 Autodesk 公司的产品, 也是最早进入国内市场的 CAD 软件之一, 从最早的 2.0 版到以后的 R13、R14、2000 直到如今的 2005 版, AutoCAD 的产品在国内的市场上走过了十几年的历程了, 从最早期的 DOS 操作命令到现在的 Windows 窗口式的操作界面, 是大家所最熟悉的 CAD 软件。AutoCAD 软件最早是针对二维设计绘图而开发的, 随着其产品的日益成熟, 在二维绘图领域该软件已经比较的完善, 而且随着产品设计的发展需要, 越来越多的产品设计已经不再停留在二维的设计领域, 正在越来越多地朝着三维的产品设计发展, 因此在 AutoCAD R12、R13 的版本

中已经加入了三维设计的部分, 而且随着版本的不断更新, 三维设计的部分也在越来越多的发展。由于该软件开发中的自身原因, 使得该软件存在一些不足之处, 比如, 该软件在二维设计中无法做到参数化的全相关的尺寸处理、三维设计中的实体造型能力不足。但是由于该软件进入国内市场较早, 价格较便宜, 对使用的微机要求较低, 使用比较简单, 因此使用者还是比较多, 该软件为中国的 CAD 软件发展还是起到了一定的贡献。总的来说, 该软件作为一套二维的绘图软件还是非常好用的。

Unigraphics Solutions 公司的 UG 本身起源于航空、汽车企业 (美国麦道航空公司), 它的应用范围基本和 Pro/E 相似, 它以 Parasolid 几何造型核心为基础, 采用基于约束的特征建模技术和传统的几何建模为一体的复合建模技术。在三维实体造型时, 由于几何和尺寸约束在造型的过程中被捕捉, 生成的几何体总是完全约束的, 约束类型是 3D 的, 而且可用于控制参数曲面。在基于约束的造型环境中支持各种传统的造型方法, 如布尔运算、扫描、曲面缝合等。该软件的主要缺点是不允许在零件之间定义约束。但 UG 具有统一的数据库, 实现了 CAD、CAE、CAM 之间无数据交换的自由转换, 实现了 22.5 轴、35 轴联动的复杂曲面加工和镗铣加工。该软件的功能也非常的强大, 一般认为 UG 是业界最好、最具有代表性的数控软件, 它提供了功能强大的刀具轨迹生成方法, 包括车、铣、线切割等完善的加工方法。它的销售也和 Pro/E 相似, 采用分模块销售的办法, 目前我国很多的航空企业都在使用这种软件, 如江西洪都航空集团公司、陕西飞机制造公司等。该软件目前的最高版本为 UG NX3。UG 软件的安装对微机的性能要求较高, UG 使用起来比较复杂, 软件相对较难掌握。

2.1.2 AutoCAD 系统和 UG 系统的特点

2.1.2.1 UG 系统

UG 是一个高度集中集成的 CAD/CAM/CAE 软件系统, 可应用于整个产品的开发过程, 包括产品概念设计、建模、分析和加工。该软件不仅具有强大的实体造型、曲面造型、虚拟装配和产生工程图等设计功能; 而且, 在设计过程中进行有限元分析、机构运动分析、动力学分析和仿真模拟, 提高设计的可靠性; 同时, 可用建立的三维模型直接生成数控代码, 用于产品的加工, 其后处理程序支持多种类型数控机床。另外它所提供的二次开发语言 UG/OPEN GRIP, UG/OPEN API 简单易学, 实现功能多, 便于用户开发专用 CAD 系统。

UG 软件具有以下特点:

- (1) 具有统一的数据库, 真正实现了 CAD/CAE/CAM 等各模块之间的无数据交换的自由切换, 可实施并行工程。
- (2) 采用复合建模技术, 可将实体建模、曲面建模、线框建模、显示几何建模与参数化建模融为一体。
- (3) 用基于特征 (如孔、凸台、型腔、槽沟、倒角等) 的建模和编辑方法作为实体造型基础, 形象直观, 类似于工程师传统的设计办法, 并能用参数驱动。
- (4) 曲面设计采用非均匀有理 B 样条作基础, 可用多种方法生成复杂的曲面, 特别适合于汽车外形设计、汽轮机叶片设计等复杂曲面造型。
- (5) 出图功能强, 可十分方便地从三维实体模型直接生成二维工程图, 能按 ISO 标准和国标标注尺寸、形位公差和汉字说明等, 并直接对实体作旋转剖、阶梯剖和轴测图挖切生成各种剖视图, 增强了绘制工程图的实用性。
- (6) 以 PARASOLID 为实体建模核心, 实体造型功能

处于领先地位。提供了界面良好的二次开发工具 GRIP 和 UFUNC,并能通过高级语言接口,使 UG 的图形功能与高级语言的计算功能紧密结合起来。

(7) 具有良好的用户界面,功能都可以通过图标实现;进行对象操作时,具有自动推理功能;同时,在每个操作步骤中,都有相应的提示信息,便于用户作出正确的选择。

2.1.2.2 AutoCAD 系统

AutoCAD 具有以下特点:

- (1) 具有完善的图形绘制功能。
- (2) 有强大的图形编辑功能。
- (3) 可以采用多种方式进行二次开发或用户定制。
- (4) 可以进行多种图形格式的转换,具有较强的数据交换能力。
- (5) 支持多种硬件设备。
- (6) 支持多种操作平台。
- (7) 具有通用性、易用性,适用于各类用户。

此外,从 AutoCAD 2000 开始,该系统又增添了许多强大的功能,如 AutoCAD 设计中心(ADC)、多文档设计环境(MDE)、Internet 驱动、新的对象捕捉功能、增强的标注功能以及局部打开和局部加载的功能,从而使 AutoCAD 系统更加完善。

2.1.3 UG 系统的特点

(1) UG 系统的核心是产品的三维模型。它所表达的几何体信息越来越完整和准确,能解决“设计”的范围越广。产品的三维模型可以直接通过投影生成二维工程图;UG 系统的模型包含了更多的实际结构特征,通过赋予零部件一定的物理属性,就可以进行产品结构分析和各种物性计算,并为后续设计制造模块(如数控加工等)应用,使用户在采用 UG 造型工具进行产品结构设计时,就能反映实际产品的构造或加工制造过程,成为实现 CAD/CAE/CAPP/CAM 集成的基础。

(2) UG 系统具有更高级的造型工具,能够构造各种复杂的产品形状,支持产品的装配设计,实现“自顶向底”和“自底向顶”等设计方法。UG 系统采用的三维特征和参数化功能还可以更加准确地表达设计者的设计意图,使设计过程更加符合设计者的设计习惯和思维方式。

(3) 三维造型系统能方便地与 CAE 系统集成,支持结构分析的前后处理和设计仿真等复杂设计过程,方便地与工艺和辅助制造系统集成,能提供数控加工所需的信息,如 NC 代码,实现 CAD/CAE/CAPP/CAM 的集成。

(4) UG 系统价格相对较贵。需要巨大的信息存储空间,对硬件的要求较高。对用户的知识和操作技巧要求较高,掌握起来比较困难。

可见,UG 系统有其自身巨大的优越性,随着计算机软硬件系统的发展,性能价格比的不断提高,这种优越性会越来越明显。但 UG 系统并不能简单地取代 AutoCAD 系统,两者可以互相配合、相得益彰。

2.2 其他三维软件的简要介绍

当前,在我国 CAD 市场上占据主流的、统治地位的是国外 CAD 软件。通过近几年的发展,国内已涌现出以 CAXA、Solid 3000 为代表的 CAD 产品,但在从软件架构和软件成熟度方面,与国外 CAD 软件尚有很大差距,尤其表现在复杂产品的系统级数字化设计、制造过程之中。当前,国外 CAD 主要分为四大谱系:

(1) 法国达索(Dassault)公司和美国 IBM 公司系列产品:CATIA V4、CATIA V5、Solidworks 等。

(2) 美国 PTC 公司,PRO/E。

(3) 美国 UGS 公司,UGNX 和 I-DEAS、Solid Edge 是该公司 CAD 代表。

(4) 美国 Autodesk 公司,MDT、INVENTOR。

三维软件从功能来看,分为高端、中端、低端三个档次以适合不同用户的需求,高端有 UG、PRO/E、CATIA 等。

(1) UGS 公司的 UG 软件。建模方法为混合建模。汽车行业建模造型,设计分析,加工制造等方面有一定的特色。UG 软件的强项是,应用集成,CAM 和曲面。

(2) PTC 公司的 PRO/E 软件。采用参数建模技术,以单一数据库和参数化,基于特征,全相关联为特征。最新推出的 PRO/E2000i 采用目标驱动设计工具,行为建模和范例套用技术,提高设计性能。

(3) IBM/Dassault 公司的 CATIA 软件,采用混合建模方法,其强项为应用集成。

(4) Solid Edge 软件。采用 Parasolid 造型内核和 STREAM 技术,基于 Windows 操作系统,以及完全与 Microsoft 产品相兼容的参数化三维实体造型系统,提供了实体造型、钣金、制图、装配、塑料模具和铸造设计,产品渲染和文档管理等功能,并能和 COSMOS、IPA、Smar Edge 无缝集成。

(5) Solid Works 软件。包含装配设计建模、零件设计建模、工程图与钣金等模块,还与高级图像渲染软件 Photoworks、高级有限元分析软件 Cosmos、机构运动学分析软件 Motionworks、产品数据管理(PDM)软件 SmarTeam 以及数控加工等著名和分析软件无缝集成。Solid Works 和 FeatureWorks 技术,解决了不同 CAD 系统间在转化模型时无法识别特征的问题。

低端有 MDT、CAXA、Solid 3000 等。国产的三维软件中,Microsolid 采用 ACIS 作为系统的内核,GEMS、GS-MCAF、龙腾,超人 CAD/CAM 三维系统是侧重于面向加工的曲面造型系统。

3 常用仿真软件

采用虚拟样机技术进行低压开关电器的研发,涉及电磁场、磁场、温度场,结构力学和多体动力学仿真及多种物理过程的耦合求解,这些仿真和求解问题的大部分可通过利用商品软件进行二次开发来解决,因而商品仿真软件是实现低压开关电器虚拟样机技术的重要工具。自 20 世纪 90 年代以来,国际上著名工程仿真软件公司继续推出一系列高性能的仿真软件,如电磁场仿真方面的 Vectorfield、Ansoft、Quickfield 软件,流场仿真的 Fluent、Phoenix 软件,多体动力学 ADAMS 软件。本节主要介绍应用广泛的综合场分析软件 ANSYS 和多体动力学软件 ADAMS。

3.1 三维综合仿真软件 ANSYS

一般情况下,工程问题是物理现象的数学模型。大多数工程问题的数学模型都有自己相应的边界条件和初值条件的微分方程组,而这些微分方程组又是针对特定的系统或控制体应用自然界的基本定律和原理推导出来的。这些控制微分方程组代表了质量、力或能量的平衡。有时,在给定的条件下通过求解这些方程组可以得到系统的精确行为。

在许多实际工程问题中,一般不能得到它的精确解,这要归因于微分方程组的复杂性,以及难以确定的边界条件和

初值条件。为了解决这个问题,常常需要借助数值方法来求近似解。解析解在系统中的任何点上都是精确的,而数值解中只是在称为“节点”的离散点上才近似于解析解。任何数值解法的第一步都是离散化,也就是说,要将待求解的对象细分成许多小的区域和节点。数值解法常分为两大类:有限差分方法和有限元方法。使用有限差分方法,需要针对每一节点写出微分方程,并且用差分方程代替偏微分方程,从而得到一组联立的线性方程组。有限差分方法对于较简单的问题是易于理解和应用的,但是使用该方法难以解决带有复杂几何条件和复杂边界条件的问题,对于具有各向异性特性的物体,它也是如此。

相比之下,有限元方法是使用积分方法而不是微分方法来建立系统的代数方程组。而且,该方法用一个连续的函数来近似描述每一个单元的解。由于内部单元的边界是连续的,整个问题的解就可以通过单个的解连接或组装起来。

ANSYS是一个大型的通用有限元计算机程序,它不仅能够进行静态或动态结构力学问题的有限元分析,还能进行热传导、流体流动和电磁学等方面的有限元分析。在过去二十多年里,ANSYS是最主要的FEA(有限元)程序。当前的ANSYS版本带有用户图形界面(GUI)的窗口、下拉菜单、对话框和工具栏等,ANSYS已经被广泛应用于许多工程领域,如航空、汽车、电子、核科学等。

ANSYS软件主要包括三个部分:前处理模块、分析计算模块和后处理模块。前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具,用户可以方便地构造有限元模型;分析计算模块包括结构分析(可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析)、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析,可模拟多种物理介质的相互作用,具有灵敏度分析及优化分析能力;后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示(可看到结构内部)等图形方式显示出来,也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。该软件提供了100种以上的单元类型,用来模拟工程中的各种结构和材料。该软件有多种不同版本,可以运行在从个人机到大型机的多种计算机设备上。其计算机版本要求的操作系统为Windows 98或Windows NT及后续版本,也可运行于UNIX系统下。

启动ANSYS后,从开始平台(主菜单)可以进入各处理模块:PREP7(通用前处理模块)、SOLUTION(求解模块)、POST1(通用后处理模块)、POST26(瞬态过程后处理模块)。

用户的指令可以通过鼠标点击菜单项选取和执行,也可以在命令输入窗口通过键盘输入。命令一经执行,该命令就会在.LOG文件中列出,打开输出窗口可以看到.LOG文件的内容。如果软件运行过程中出现问题,查看.LOG文件中的命令流及其错误提示,将有助于快速发现问题的根源。.LOG文件的内容可以略作修改存到一个批处理文件中,在以后进行同样工作时,由ANSYS自动读入并执行,这是ANSYS软件的第三种命令输入方式。这种命令方式在进行某些重复性较高的工作时,能有效地提高工作速度。

3.1.1 前处理模块 PREP7

双击实用菜单中的“Preprocessor”,进入ANSYS的前处理模块。这个模块主要有两部分内容:实体建模和网格划分。

3.1.1.1 实体建模

ANSYS程序提供了两种实体建模方法:自顶向下与自

底向上。自顶向下进行实体建模时,用户定义一个模型的最高级图元,如球、棱柱,称为基元,程序则自动定义相关的面、线及关键点。用户利用这些高级图元直接构造几何模型,如二维的圆和矩形,以及三维的块、球、锥和柱。无论使用自顶向下还是自底向上的方法建模,用户均能使用布尔运算来组合数据集,从而“雕塑出”一个实体模型。ANSYS程序提供了完整的布尔运算,诸如相加、相减、相交、分割、黏结和重叠。在创建复杂实体模型时,对线、面、体、基元的布尔操作能减少相当可观的建模工作量。ANSYS程序还提供了拖拉、延伸、旋转、移动和拷贝实体模型图元的功能。附加的功能还包括圆弧构造、切线构造、通过拖拉与旋转生成面和体、线与面的自动相交运算、自动倒角生成、用于网格划分的顶点的建立、移动、拷贝和删除。自底向上进行实体建模时,用户从最低级的图元向上构造模型,即用户首先定义关键点,然后依次是相关的线、面、体。

3.1.1.2 网格划分

ANSYS程序提供了使用便捷、高质量的对CAD模型进行网格划分的功能,它包括4种网格划分方法:延伸划分、映像划分、自由划分和自适应划分。延伸网格划分可将一个二维网格延伸成一个三维网格。映像网格划分允许用户将几何模型分解成简单的几部分,然后选择合适的单元属性和网格控制,生成映像网格。ANSYS程序的自由网格划分器功能是十分强大的,可对复杂模型直接划分,避免了用户对各个部分分别划分然后进行组装时各部分网格不匹配带来的麻烦。自适应网格划分是在生成了具有边界条件的实体模型以后,用户指示程序自动生成有限元网格,分析、估计网格的离散误差,然后重新定义网格大小,再次分析计算、估计网格的离散误差,直至误差低于用户定义的值或达到用户定义的求解次数。

3.1.2 分析计算模块 SOLUTION

前处理阶段完成建模以后,用户可以在求解阶段获得分析结果。在该阶段,用户可以定义分析类型、分析选项、载荷数据和载荷步选项,然后开始有限元求解。

ANSYS软件能完成结构静力、结构动力学、热分析、电磁场、动力学、流体动力学等多种工程分析问题。其中热分析程序可处理热传递的三种基本类型:传导、对流和辐射。热传递的三种类型均可进行稳态和瞬态、线性和非线性分析。热分析还具有可以模拟材料固化和熔解过程相变分析能力以及模拟热与结构应力之间的热-结构耦合分析能力。

电磁场分析主要用于电磁场问题的分析,如电感、电容、磁通量密度、涡流、电场分布、磁力线分布、力、运动效应、电路和能量损失等,还可用于螺线管、调节器、发电机、变换器、磁体、加速器、电解槽及无损检测装置等的设计和分析领域。

3.1.3 后处理模块 POST1 和 POST26

ANSYS软件的后处理过程包括两个部分:通用后处理模块POST1和时间历程后处理模块POST26。通过友好的用户界面,可以很容易获得求解过程的计算结果并对其进行显示。这些结果可能包括位移、温度、应力、应变、速度及热流等,输出形式有图形显示和数据列表两种。

3.1.3.1 通用后处理模块 POST1

这个模块对前面的分析结果能以图形形式显示和输出。例如,计算结果(如应力)在模型上的变化情况可用等效线图表示,不同的等值线颜色,代表了不同的值(如应力值)。

浓淡图则用不同的颜色代表不同的数值区（如应力范围），清晰地反映了计算结果的区域分布情况。

3.1.3.2 瞬态过程后处理模块 POST26

这个模块用于检查在一个时间段或子步历程中的结果，如节点位移或应力。这些结果能通过绘制曲线或列表查看。绘制一个或多个变量随频率或其他量变化的曲线，有助于形象化地表示分析结果。另外，POST26 还可以进行曲线的代数运算。

3.1.4 ANSYS 分析过程

ANSYS 软件包含多种有限元分析功能，从简单的线性静态分析到复杂的非线性动态分析，以及流体分析、热分析、电磁学分析等。

一个典型的 ANSYS 分析过程可分为 4 个步骤：

- (1) 建立模型和划分网格。
- (2) 添加载荷和约束。
- (3) 求解。
- (4) 后处理过程。

用户可以在 ANSYS 里直接建立模型，当然，作为一种可供替换的方案，也可以先在用户擅长的 CAD 系统里建立实体模型，把模型存为 IGES 文件格式，然后把这个文件输入到 ANSYS 中。一旦模型成功地输入后，就可以像在 ANSYS 中创建的模型那样对这个模型进行网格划分。

3.2 多体动力学仿真软件 Adams

Adams 软件包括 3 个核心模块：View（用户界面模块）、Slover（方程求解器）、PostProcessor（仿真结果后处理）。View 可以满足一般机械系统的运动学和动力学的仿真，对于一些特殊领域，Adams 提供了如 Car（轿车模块）、Aircraft Landing Gear（飞机起落架模块）、Rail（铁道模块）等专业软件包。

在 Adams 的 3 个基本程序中，Adams/View 提供了一个直接面向用户的基本操作对话环境和虚拟样机分析的前处理功能，其中包括样机的建模和样机模型数据的输入与编辑、与求解器（Adams/Slover）和后处理（Adams/Post-Processor）等程序的自动连接、虚拟样机分析参数设置、各种数据的输入和输出、同其他应用程序的接口等。ADAMS/Solver 模块在 Adams 中处于心脏的地位，它自动形成机械系统模型的动力学方程，提供静力学、运动学和动力学的解算结果。Adams/PostProcessor 模块用来输出高性能的动画，各种仿真结果数据曲线，还可以进行曲线编辑和数字信号处理等，使用户可以方便、快捷地观察和研究 Adams 的仿真结果。

用 Adams/View 进行机械仿真的基本步骤如图 2.4-2 所示。以下对主要步骤进行介绍并总结一些在使用中应注意的问题。

3.2.1 样机建模

对于虚拟样机的几何建模，Adams 提供 4 种类型的几何体：刚性形体、柔性形体、点质量和地基形体。点质量是指仅有质量而没有惯性矩的点，地基形体指没有质量和速度，自由度为零，任何时候都保持静止的物体。每一个新产生的几何体都设有一个参考坐标系：零件机架坐标系，在仿真过程中，几何体的尺寸和形状相对于该几何体参考坐标系静止不变。

Adams 提供了丰富的基本形体建模工具库，如长方体、圆环等，也可以将若干基本形体通过一定的方式组合，如通过合并两个相交的实体来形成复杂的几何形体，并且可以添

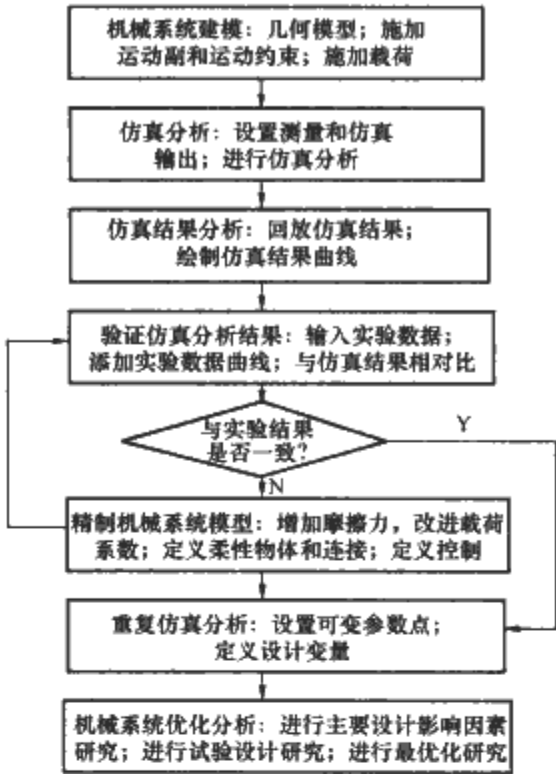


图 2.4.2 虚拟样机仿真分析步骤

加几何体细节结构，如边缘倒角、挖空等。除几何形状外，仿真分析时所需的构件特性还包括质量、转动惯量、初始速度等。在几何建模时，程序根据设置的默认值自动确定构件的相关值，也可根据需要修改构件特性。

相对于专业三维实体造型软件如 Solid Works、UG 等，Adams 在复杂造型这一方面的功能较差，但它提供了一个 Exchange（图形接口）模块，其功能是利用 IGES、STEP、STL、DWG/DXF 等产品数据交换库的标准文件格式完成 Adams 与其他 CAD/CAM/CAE 软件之间数据的双向传输，使 Adams 与 CAD/CAM/CAE 软件更紧密地集成在一起。Adams/Exchange 自动将图形文件转换成一组包含外形、标志和曲线的图形要素，通过控制传输时的精度获得较为精确的几何形状。

在使用 Exchange 模块转换 CAD 图形文件时，应注意以下问题：

(1) 在转换图形文件时，如遇到 Adams 不支持的图形信息，Exchange 将采用线性近似技术转换图形。如将 IGES 格式图形文件中的一些非线性形体转换为多边形或多边线。

(2) 构件的质量信息是进行仿真的重要基础数据。在转换 CAD 图形文件时，可能会丢失构件的质量和转动惯量信息，因此在输入图形后，应检查构件这一信息，必要时重新输入。

(3) 在 CAD 应用程序中确立的零件装配关系，Adams 中可能不再使用，此时需要采用一些特殊的方法来重新确定。

3.2.2 样机约束的施加

建模时，可以通过各种约束关系限制构件之间的某些相对运动，并以此将不同构件组成一个机械系统，被连接的构件可以是刚体构件、柔性构件或者点质量。

(1) Adams 可以处理四种类型的约束：

1) 常用运动副约束，如转动副、棱柱副等。这类约束通过约束不同构件间的旋转和移动自由度来使构件按需要运动。

2) 指定约束方向，即限制某个运动方向，如限制一个构件总是沿着平行于另一个构件的方向运动。

3) 接触约束，定义两构件在运动中发生接触时是怎样相互约束的。

4) 约束运动,如指定一个构件遵循某个时间函数按指定的轨迹规律运动。这类约束通过定义机构遵循一定的规律进行运动,可以约束机构的某些自由度,另一方面也决定了是否需要施加力来维持所定义的运动。

(2) 在添加约束时应注意以下几个方面:

1) 应逐步对构件施加各种约束,并经常对施加的约束进行试验,保证没有约束错误,要注意选择对象的顺序和约束方向是否正确,Adams 中设定两个被连接的构件中,构件 1 被连接到构件 2 上面。

2) 应该注意约束的方向是否正确。错误的约束方向可以导致某些自由度没有被约束而使系统运动混乱。

3) 尽量用一个运动副来完成所需的约束,如果使用多个,每个运动副实现的自由度约束有可能重复,这样会导致无法预料的结果。

4) 在没有作用力的状态下,通过运行系统的动力学分析来检验样机的各种约束加的是否正确。

3.2.3 仿真分析

在建模和正确施加约束后,就可以对系统进行仿真。在仿真前,应确定仿真分析要求获得的输出,并且进行一些最后的检验,建立正确的初始条件,然后设置相关参数,如分析类型、时间、分析步长和分析精度等。Adams/View 可以自动调用求解程序,再由求解程序完成以下四种类型的仿真分析:

(1) 动力学仿真 (Dynamic): 通过求解一系列非线性微分方程和代数方程,仿真分析自由度大于零的复杂系统的运动和种力。

(2) 运动学仿真 (Kinematics): 通过求解一系列代数方程组,仿真分析自由度等于零有确定运动系统的运动。

(3) 静态分析 (Static): 通过力的平衡条件,求解构件各种作用力的静态分析。

(4) 装配分析 (Assemble): 用于发现校正装配和操作过程中的错误连接,以及不恰当的初始条件。

完成仿真分析后,程序自动回到 View 界面,因此可以视 Solver 为一个黑匣子。Adams/Solver 默认的仿真输出包括两大类:一类是样机各种对象(构件、力、约束等)的基本信息的描述,如构件质心位置等;另一类输出是各种对象的有关分量信息,如构件在 X、Y、Z 方向的分力和总的合力等。此外,还可以利用 Adams/View 提供的测量手段和指定输出方式自定义一些特殊的输出。

仿真结果的后处理是通过调用独立的 PostProcessor 来完成的,这个模块主要提供仿真结果的回放和分析曲线绘制功能。通过仿真结果的后处理,可以完成以下工作:①对进一步调试样机提供指南;②可以通过多种方式验证仿真结果;③可以绘制各种仿真分析曲线并进行一些曲线的数学和统计计算;④可以通过图形和数据曲线比较不同条件下的分析结果。

一般程序默认的仿真初始设置是较理想的,不要随便改动。在对一个新的样机分析的时候,应该最少进行不同迭代精度的多次分析,比较前后两次不同精度时的仿真结果,在两种不同的迭代分析结果基本相同时,才可以认为获得了较可靠的仿真结果,而且此时的迭代精度是最佳的迭代精度。

3.2.4 精制模型

初步仿真结果和实际情况还相差很大,因为在实际的系统中,存在着许多未知参数,如弹簧的阻尼系数、各种类型的摩擦系数等,这就需把仿真结果同某些在实际中容易测量的量的实验曲线相对比,然后精制模型。在 Adams 中,

实验数据可以以文本的格式输入,并以图形的方式显示出来。精制模型是指通过修改各种约束的参数来使样机与实际情况更接近。如 Adams 在定义接触副时有两接触物体的刚度系数,产生接触力的非线性指数,最大黏滞阻尼系数,最大阻尼时物体的变形深度,动、静态阻尼系数等参数;定义转动副时有转动摩擦力矩臂长,摩擦力矩预载荷,动、静态摩擦力矩阻尼系数等参数。通过调节这些参数的值,可以使仿真结果与试验结果得到很好的吻合。

3.2.5 参数化建模与设计

精制模型后就可以仿真某些不易测量的量,但在实际应用过程中,有时需要对虚拟样机可能出现的情况作进一步的深入分析,并进行优化设计。这时利用 Adams 提供的参数化建模和参数化分析功能可以大大提高分析效率。通过参数化建模,可以将参数值设置为可以改变的变量。在分析过程中,只需改变样机模型中有关的参数,程序可以自动更新整个样机模型,还可以由程序根据预先设置的可变参数,自动进行一系列仿真分析,观察不同参数值下样机的变化。

进行参数化设计分析的第一步,是确定影响样机性能的关键输入值,然后对这些输入值进行参数化处理。Adams 提供了参数表达式、参数化点坐标、运动参数化和设计变量 4 种参数化方法。

除了 4 种参数化方法,Adams 还提供了几种参数化分析工具。参数化分析中,Adams 采用不同的设计参数,自动运行一系列仿真分析,然后返回分析结果,这样就可以观察设计参数变化的影响。

Adams 提供 3 种参数化分析过程:①设计研究 (Design study),即设计研究考虑一个设计变量的变化对样机性能的影响;②试验设计 (Design of Experiments),试验设计可以考虑多个设计变量同时发生变化时对样机性能的影响;③优化分析 (Optimization),通过优化分析,可以获得在给定设计变量变化范围内,目标对象达到最大或最小值的工况。

根据图 2.4-2 所示步骤可以完成一个复杂的机械系统的仿真。但为了使仿真能够顺利的进行,在仿真中应注意以下几个问题:

(1) 在最初的仿真分析建模时,不必过分追求几何形体的细节部分同实际零件完全相同,因为这要花费大量的几何建模时间,而此时的关键是能够顺利进行仿真并获得初步的结果。从软件的求解原理来看,只要仿真构件几何形体的质量、质心位置、惯性矩和惯性积同实际构件相同,仿真结果是等价的。待获得满意的仿真分析结果以后,再完善零件几何形体的细节部分和视觉效果。

(2) 如果模型中含有非线性的阻尼,可以先从分析线性阻尼开始,待线性阻尼分析顺利完成后,再改为非线性阻尼进行分析。

(3) 在进行较复杂的系统仿真时,可以将整个系统分解为若干个子系统,先对这些子系统进行仿真分析和试验,逐个排除建模等仿真过程中隐含的问题,最后进行整个系统的仿真分析试验。

(4) 虽然 Adams/View 可以进行非常复杂的机械系统的分析,但在设计虚拟样机时,应该尽量减小系统的规模,仅考虑影响样机性能的构件。

4 电磁脱扣器与热脱扣器保护特性的计算

4.1 概述

按照低压断路器的定义,当被保护线路发生故障时,它

应能自动开断故障电路,脱扣器作为断路器的重要部件用于反应线路情况。在线路发生故障时,它使操动机构脱扣,迅速开断电路。低压配电线路的故障有短路、过载、欠电压、接地等多种类型,因而为反应上述故障,设计制造了相应的脱扣器。按工作原理来分类,脱扣器目前可分为两大类,它们是热—磁脱扣器和基于微处理器的智能脱扣器,后者也被称为数字脱扣器。热脱扣器用于保护过载,利用双金属片的弯曲来动作,因而与通过的电流和电流加热双金属片的时间有关,具有反时限保护特性。热脱扣器的加热方式按脱扣器额定电流的大小,可分为直接加热、间接加热、复式加热和通过电流互感器加热四种。磁脱扣器是一种依靠主电路电流串联励磁的电磁铁,当故障电流达到整定值就动作,起短路保护作用,也被称为瞬时脱扣器。智能脱扣器基于微处理器,它可具有多种功能,如过载、瞬时、短延时、接地、区域联锁和通信等。目前热—磁脱扣器主要用于 A 类断路器,如小型和塑壳断路器;智能脱扣器主要用于 B 类断路器,如万能式断路器。本节主要介绍热—磁脱扣器的虚拟样机技术。

基于耦合场分析的电磁脱扣器保护特性分析,首先在给定短路电流条件下,计算载流导体中的电流分布,以此为励磁,计算脱扣器磁系统的磁场,再进一步计算脱扣器的电磁吸力和静态特性,与电路瞬态和脱扣器可动部分的机械运动方程相耦合,即可求得瞬时脱扣器的保护特性。热脱扣器的保护特性仿真可用热场和热路两种方法进行,这里重点介绍热路方法。

4.2 电磁脱扣器保护特性的仿真

4.2.1 拍合式电磁脱扣器

塑壳断路器用电磁脱扣器的磁系统一般为拍合式,个别额定电流小的也用螺管式,这里取常用的拍合式电磁脱扣器为研究对象,脱扣器额定电流为 100A,这种脱扣器依靠连接母排通过的电流作为励磁,以反映主回路电流的大小。图 2.4-3 所示塑壳断路器磁脱扣器电磁铁,由于结构上对称,仅绘出其 1/2 对称模型,图中 xOy 面为对称面。

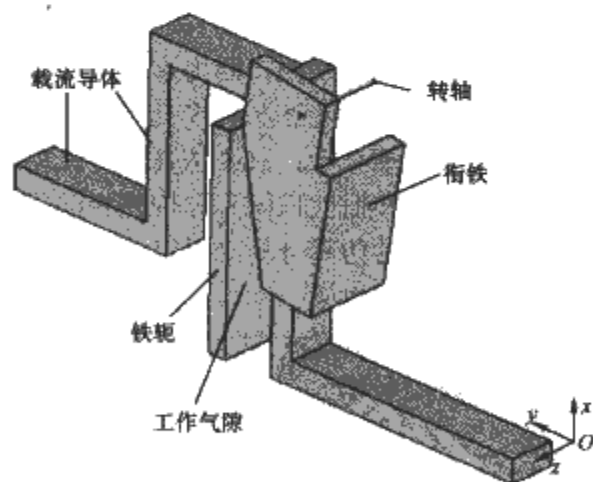


图 2.4-3 塑壳断路器磁脱扣器电磁铁
(1/2 对称模型)

该脱扣器电磁铁为拍合式,无铁心,当作为载流导体的母排通过主回路电流达整定值时,由衔铁与轭铁之间的两处工作气隙的磁通产生电磁吸力,克服反作用力,使衔铁动作。

4.2.2 脱扣器静态特性计算

磁脱扣器的静态场分析采用三维有限元方法,借助有限元分析软件 ANSYS 进行,包括载流导体内的电流场分析和脱扣器的磁场分析。载流导体的电流密度分布根据以下两个

基本方程进行计算

$$E = -\nabla V, J = \sigma E \quad (2.4-1)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (2.4-2)$$

式中: E 为电场强度; V 为标量电动势; J 为电流密度矢量; σ 为电导率。

式 (2.4-2) 为电流的无散度条件,即场域中任意封闭面的净电流为零。

计算得到了载流导体的电流密度分布之后,由其产生的脱扣器磁场根据式 (2.4-3) 进行计算

$$\nabla \times (v \nabla \times A) = J, B = \nabla \times A \quad (2.4-3)$$

式中: A 为矢量磁通势; B 为磁感应强度; v 为磁阻率。

脱扣器的三维磁场计算完毕后,与载流导体匝链的磁链 Ψ 采用式 (2.4-4) 进行计算

$$\Psi = n \frac{2W}{I} \quad (2.4-4)$$

式中: n 为载流导体匝数; W 为磁场能量; I 为载流导体电流。

衔铁所受电磁吸力采用 Maxwell 应力张量法进行计算:与衔铁接触的空气单元 i 的应力为 T_i ,接触面积为 s ,单元的力密度为 F_i ,单元质心到衔铁转轴的距离为 d_i ,则衔铁对转轴的磁转矩 T 见式 (2.4-5) 和式 (2.4-6)。

$$F_i = \iint_s T_i ds \quad (2.4-5)$$

$$T = \int_V d_i \times F_i dv \quad (2.4-6)$$

通过上面的方法,就可以计算出磁脱扣器衔铁的磁转矩和磁链随气隙和电流变化的静态数据网格,并用于后面的脱扣器动态特性计算。

图 2.4-4 示出了该脱扣器载流导体的电流密度分布 (1/2 对称模型)。

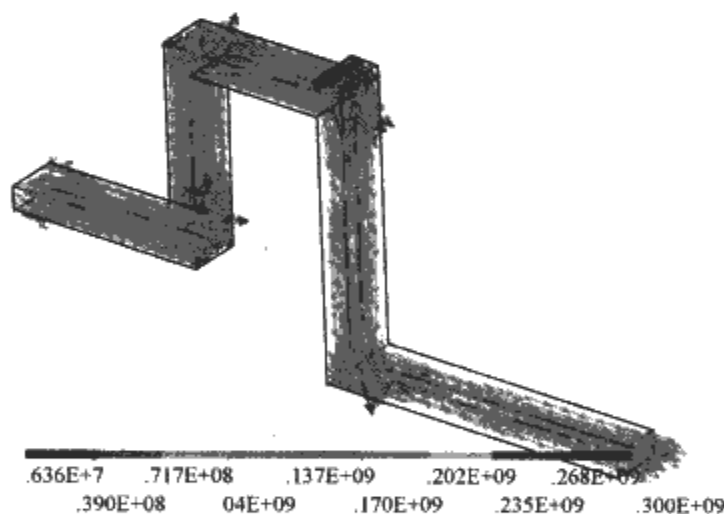


图 2.4-4 磁脱扣器载流导体电流密度分布

在有限元分析中,模型的剖分对计算结果的精度有至关重要的影响,若剖分不合理,往往会造成很大的误差,甚至可达 20% 以上。为了保证脱扣器三维磁场的计算精度,采用逐次加密剖分的方法,比较前后两次的计算结果 (磁力和磁通),直到相差小于 1% 为止,这时认为磁场计算误差也低于 1%。图 2.4-5 所示为最终确定的磁脱扣器场域剖分 (面对称面)。

图 2.4-6 为仿真获得的磁脱扣器在不同电流下吸力矩随气隙 (衔铁与轭铁夹角) 的变化曲线。这些结果数据的列表也即为保护特性计算所需要的静特性数据网格。

4.2.3 脱扣器保护特性计算

结合静态特性计算可得到的数据网格,磁脱扣器的动态特性,即保护特性,可以通过求解下面的方程组得到

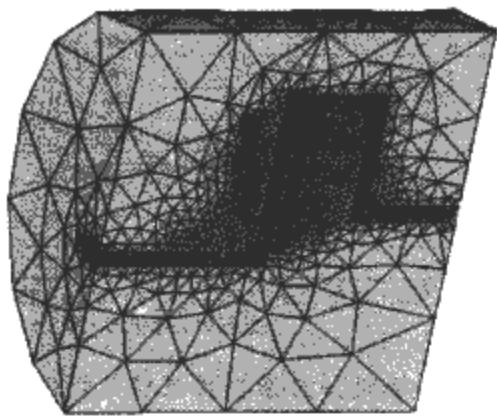


图 2.4-5 磁脱扣器场域有限元剖分图

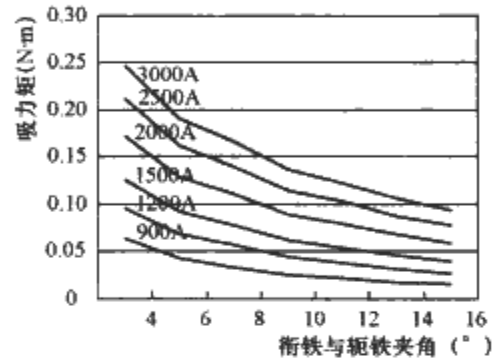


图 2.4-6 不同电流下吸力矩随气隙变化曲线

$$\begin{cases} i = I_m \sin(2\pi ft + \varphi) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M(\theta, i) - M_f(\theta) - M_m}{J} \\ -\frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (2.4-7)$$
$$M_f = \begin{cases} k(\theta_{\max} - \theta + \theta_0) & (0 \leq \theta < \theta_1) \\ M_r + k(\theta_{\max} - \theta + \theta_0) & (\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2) \\ k(\theta_{\max} - \theta + \theta_0) & (\theta_2 < \theta \leq \theta_{\max}) \end{cases} \quad (2.4-8)$$

$$\begin{cases} \theta|_{t=0} = \theta_{\max} \\ \omega|_{t=0} = 0 \\ i|_{t=0} = 0 \end{cases} \quad (2.4-9)$$

式中： θ 为衔铁与轭铁夹角（工作气隙）； i 为励磁电流； φ 为短路合闸相角； I_m 为电流幅值； J 为动铁心转动惯量； ω 为动铁心角速度； M_m 为摩擦力矩； M 为吸力矩； M_f 为反力矩； k 为反力弹簧平均弹性系数； θ_0 为反力弹簧初始拉伸（压缩）角度； M_r 为平均脱扣力矩。

M_f 包括反力弹簧反力和脱扣力两部分，其中脱扣力的作用行程很短，仅在 $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ 时起作用

$$\theta_2 - \theta_1 \ll \theta_{\max} - \theta_2 \quad (2.4-10)$$

图 2.4-7 为磁脱扣器反力示意图。

磁脱扣器在短路电流作用下的动作过程分为两个阶段：第一阶段为电磁铁触动过程，是从短路电流发生到衔铁开始动作，这一阶段衔铁不会动作，直到吸力矩大于反力矩，而 $\theta = \theta_{\max}$ ，计算中仅求解式（2.4-7）中的第一个方程（电路瞬态方程）；第二阶段为脱扣器衔铁运动过程，从衔铁开始运动到其带动脱扣杆并使机构脱扣为止，这一阶段的计算就是联立（2.4-7）中的三个方程用四阶龙格—库塔法进行离散求解，过程中所需吸力和磁链值仍由对静态数据网格二次插值得到。衔铁转动过程中的摩擦阻力主要在转轴处，力矩很小，计算中忽略不计。表 2.4-2 示出了研究对象磁脱扣器动态特性计算的参数。图 2.4-8 示出了用上述方法仿真计算

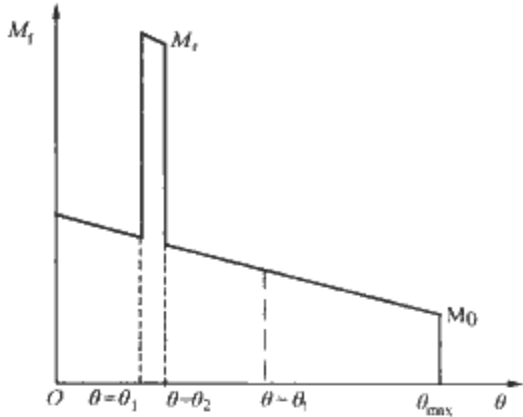


图 2.4-7 磁脱扣器反力示意图

获得的电磁脱扣器在 1500A 短路电流下的动态特性曲线。脱扣器动作时间的测量原理如图 2.4-9 所示。

表 2.4-2 磁脱扣器动态特性计算参数

参 数	值
J (kg · m ²)	1.278×10^{-7}
θ_{\max} (rad)	0.304 5
k (N · m/rad)	0.009
θ_0 (rad)	0.96
M_r (N · m)	0.03
θ_1 (rad)	0.227 8
θ_2 (rad)	0.234 7
额定电流 (A)	100

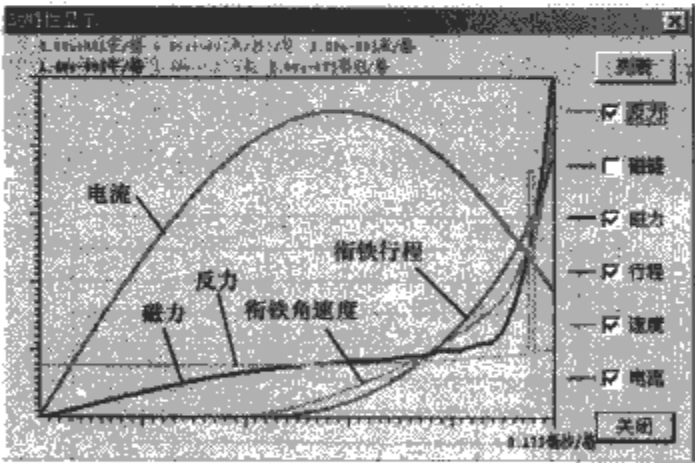


图 2.4-8 1500A 短路电流下电磁脱扣器动态特性曲线

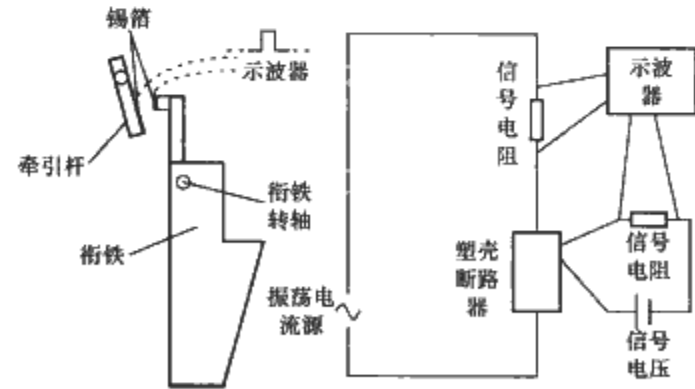


图 2.4-9 脱扣器动作时间测量原理图

短路电流到来后，脱扣器吸力克服反力开始运动，当衔铁打到牵引杆上时，粘在上面的极薄的锡箔相接触，外部测量电路接通，示波器接收到一个电压上升沿信号，记录短路电流起始点到该上升沿信号之间的时间差作为测量值，但此

时并未脱扣，衔铁还要转动一段角度才能带动牵引杆脱扣。实验中，测量值小于脱扣时间，衔铁转角为 $\theta_{\max}-\theta_t$ ，相应地与实验对比的计算值也取同样的行程（见图 2.4-7），实验值与计算值的对比曲线见图 2.4-10。表 2.4-3 为脱扣器动作时间计算值与实验值的对比。

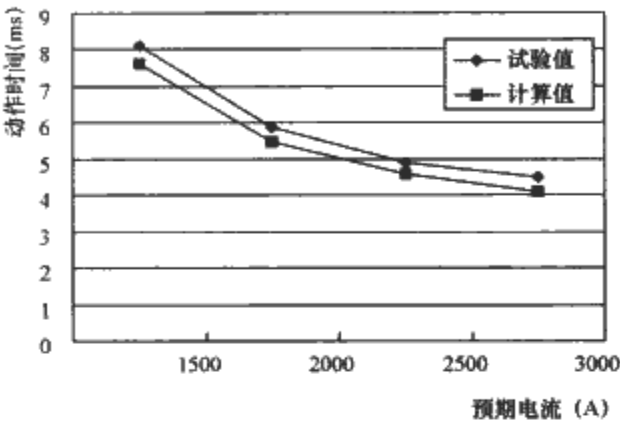


图 2.4-10 脱扣器动作时间实验值与计算值对比

表 2.4-3 脱扣器动作时间实验值与计算值对比

预期电流 (A)	1500	2000	2500	3000
实验值 (ms)	8.1	5.9	4.9	4.5
计算值 (ms)	7.6	5.5	4.6	4.1
误差 (%)	6.1	7.3	6.1	8.9

实验验证表明：计算值相对于试验值的误差不超过 9%。

4.3 磁脱扣器保护特性分析

磁脱扣器的动态特性包括衔铁与轭铁转角 $\theta=\theta(t)$ 、吸力矩 $M=M(t)$ 、角速度 $\omega=\omega(t)$ 、电流 $i=i(t)$ 、反力矩 $M_f=M_f(t)$ 、脱扣时间 t_r 、脱扣电流 I_r ，其中最主要的性能指标是 t_r ，在同样的短路电流下， t_r 越小越有利于限流和开断。脱扣器在不同短路电流下的 t_r 构成保护特性，图 2.4-11 所示为仿真获得的上述磁脱扣器($I_r=1500\text{A}$)的保护特性曲线。

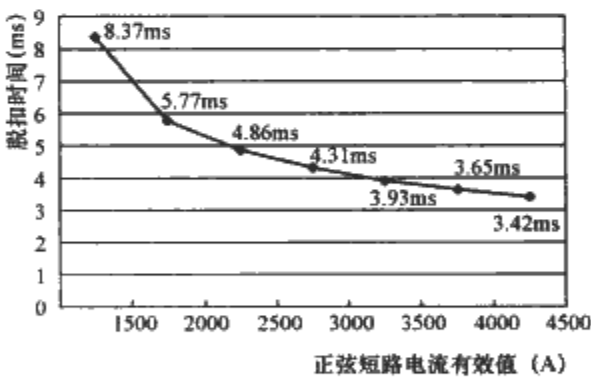


图 2.4-11 磁脱扣器保护特性仿真曲线

从图 2.4-11 中可以看到，短路电流从临界值 1500A 到 2000A 这一区段内 t_r 随电流增大减小最快，达 2.6ms；从 2500A 之后， t_r 减小的速度明显变慢，从 2500A 到 4500A， t_r 仅减小 1.44ms。

4.3.1 保护特性与反力弹簧特性的关系

磁脱扣器的动作时间与动作值决定于电磁铁动态吸力特性与负载反力特性的配合，增大反力会提高动作时间和动作电流；减小反力会减小动作时间和动作电流。这样，在磁脱扣器的设计中，当磁系统确定后，就可根据需要选取反力特性，其值由脱扣器的动特性计算决定。

图 2.4-12 和图 2.4-13 分别示出了其他参数不变，仅改变弹簧刚度 k 和反力弹簧初始拉伸（压缩）角度 θ_0 时保护特性的变化曲线。

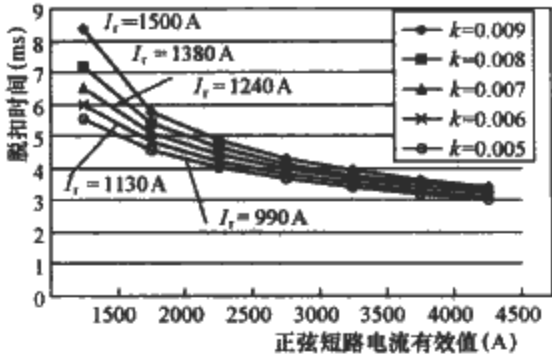


图 2.4-12 磁脱扣器保护特性随 k 变化的曲线

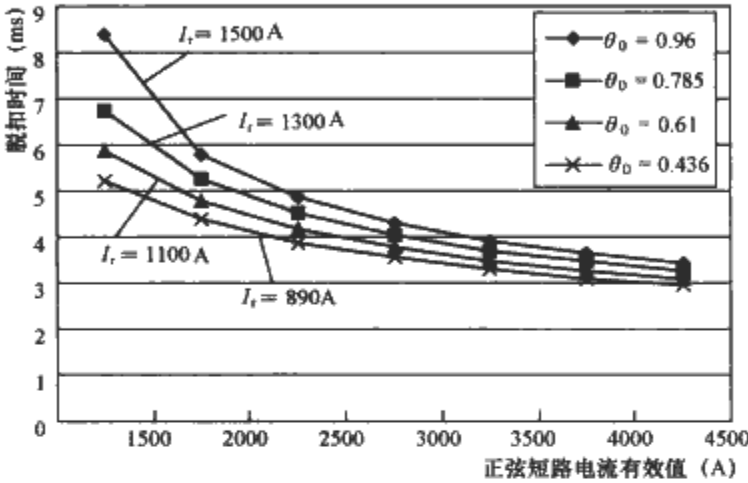


图 2.4-13 磁脱扣器保护特性随 θ_0 变化的曲线

磁脱扣器的最小动作电流称为脱扣电流，由图 2.4-12 和图 2.4-13 可见，随着 k 和 θ_0 的减小，脱扣电流逐渐减小，相同电流下的脱扣时间也随之缩短，但随着电流增大、缩短越来越慢，电流达到 $45I_N$ 时脱扣时间最长与最短相差小于 0.5ms。当 k 以等差数列减小时，脱扣电流的减小不为等差数列；而当 θ_0 以等差数列减小时，脱扣电流则呈等差数列减小，因此通过改变反力弹簧的初始长度更容易实现断路器脱扣电流的线性调节。

4.3.2 保护特性与初始工作气隙的关系

从图 2.4-6 可以看到：衔铁所受磁力随气隙减小而增大，并且上升越来越快。改变初始气隙（脱扣时衔铁行程作同样变化），脱扣器的脱扣时间和脱扣电流也随之变化，表 2.4-4 列出了其他不变、只改变衔铁初始工作气隙（转角） θ_{\max} 时，脱扣时间和脱扣电流的变化关系。

表 2.4-4 脱扣电流和脱扣时间随 θ_{\max} 的变化关系

θ_{\max} (rad)	脱扣电流 (A)	分断 2000A 时动作时间 (ms)
0.305 4	1500A	5.77
0.288	1450A	5.51
0.270 5	1380A	5.27
0.253	1310A	5.01
0.235 6	1270A	4.78
0.218 1	1240A	4.56

由表 2.4-4 可见，减小 θ_{\max} 时，脱扣电流和脱扣时间都随之减小。 θ_{\max} 从 0.305 4rad 减小到 0.218 1rad，幅度为 28.6%，脱扣电流则从 1500A 减小到 1240A，幅度为 17.3%。由图 2.4-13 所示， θ_0 从 0.96rad 减小到 0.436rad，幅度为 54.6%，脱扣电流则从 1500A 减小到 890A，幅度为 40.7%。 $\frac{17.3\%}{28.6\%}=0.6<\frac{40.7\%}{54.6\%}=0.745$ ，由此可见，改变同样大小的脱扣电流，调节 θ_{\max} 的方式所需的调节量比调节 θ_0 的方式更大，并且从表 2.4-4 中还可看到脱扣电流随 θ_0

的变化是非线性的。由以上分析结果可得出：当塑壳断路器磁脱扣器的磁系统尺寸确定时，可通过改变反力弹簧的刚度和初始拉伸（压缩）长度来适应不同额定电流和脱扣电流的要求。相对于弹簧刚度的调节方式，通过改变反力弹簧的初始拉伸（压缩）长度调节脱扣电流更易实现线性调节；其他条件不变时，改变磁脱扣器的初始工作气隙，脱扣电流随之作非线性变化；相对于改变反力弹簧初始拉伸（压缩）长度调节脱扣电流的方式，改变初始工作气隙对脱扣电流的调节范围较小。

4.4 热脱扣器保护特性的等效热路计算方法

热脱扣器工作原理以电流的热效应为基础，当过载电流通过双金属片时，使双金属片受热弯曲，推动断路器的脱扣轴而使断路器断开。热脱扣器保护特性的计算属于热计算的范畴，可用温度场和热路两种方法进行计算。三维温度场计算工作量大，但精度高；热路方法精度稍差，但简单，适宜于工程应用，并且也是当前国际上正在发展中的一种新方法。这里介绍热脱扣器保护特性的等效热路计算方法。

自然界有电磁场，也有热场。同为场，它们有一定的相似性。电磁场中有电路和磁路的概念，热场中也有热路的概念。从传热的机理上，热路、电路与磁路是有差别的，因为在实际应用上没有什么材料能很好地约束热流在一条“路”中运动，而导体和铁磁材料却能把绝大部分电流和磁通约束在其中。从这点上讲，把热场简化为热路，其精度比电磁场简化电路和磁路的要低。通过适当处理也可满足工程计算要求，类比的热路见图 2.4-14。

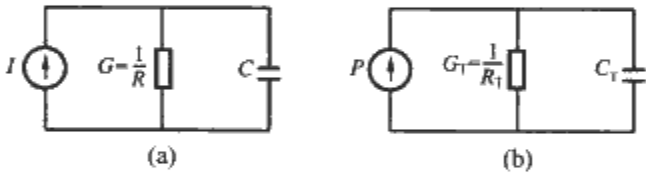


图 2.4-14 电路与类比的热路

以下列出稳态和瞬态电路和热路的对应方程：
电路欧姆定律

$$R = U/I \quad (2.4-11)$$

热路欧姆定律

$$R_T = \tau/P_T \quad (2.4-12)$$

对图 2.4-14 所示的电路和热路可写出下列瞬态方程：

电路瞬态

$$i = u/R + Cdu/dt \quad (2.4-13)$$

热路瞬态

$$P_T = \tau/R_T + C_T d\tau/dt \quad (2.4-14)$$

根据相似性原理，对电路参数和热路参数进行类比，如表 2.4-5 所示。

表 2.4-5 热路参数与电路参数的类比				
电路参数	电压 U	电流 I	电阻 R	电容 C
热路参数	温差 τ	热流 P_T	热阻 R_T	热容 C_T

4.5 热脱扣器反时限保护特性的计算

4.5.1 热脱扣器等效热路的建立

取一额定电流为 250A 的塑壳断路器热脱扣器为研究对象，脱扣器的整定电流为 190A，其临界动作电流为 1.1 倍整定电流，即 210A，双金属片材料为 SJ20110，根据样机测试，热脱扣器动作温升为 100K。热脱扣器的结构见图 2.4-15，双金属片采用通过热元件间接加热，断路器工作

时，主回路电流流过与双金属片紧密接触的加热元件，利用其电阻损耗对双金属片加热，塑壳断路器的加热元件为引线母排的一部分。加热元件产生的热量传递路径如下：首先一部分热量使加热元件本身温度升高，另一部分热量使其紧密接触的双金属片、磁轭和衔铁支架温度升高。然后传递给包括衔铁、导电连接、操动机构，灭弧系统及空气间隙在内的导热体，再传给外壳。最后由外壳表面将热量散发到周围环境中去。

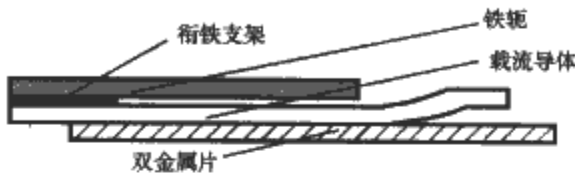


图 2.4-15 双金属片的热结构

采用瞬态热路法建立断路器发热、传热的数学模型。双金属片和磁轭到周围环境有三层介质：① 到断路器外壳内壁之间的空气及断路器内部的零件，其传热机制包括传导和对流；② 断路器外壳内外壁之间的塑料层，其传热机制为传导；③ 外壳外壁以外的空气层，其传热机制主要为对流。根据以上传热路径可建立断路器等效热路，如图 2.4-16 所示。等效热路为三极断路器中的一相。

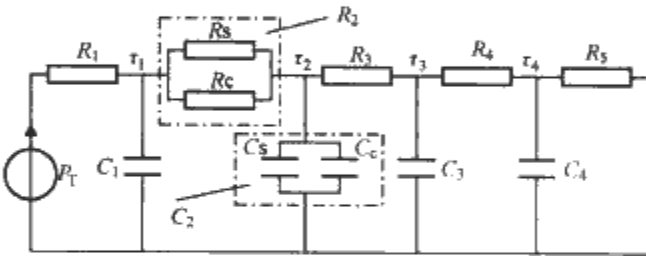


图 2.4-16 断路器等效热路

图 2.4-16 所示断路器等效热路各参数意义如表 2.4-6 所示。

表 2.4-6 断路器等效热路各参数意义	
参数	意 义
R_1	加热体热阻
R_s	双金属片热阻
R_c	磁轭热阻
R_3	双金属片及磁轭到断路器外壳内壁之间的空气及断路器内部零件的总热阻
R_4	断路器外壳内外壁之间的塑料层的热阻
R_5	断路器外壳外壁对流热阻
C_1	加热体热容
C_s	双金属片热容
C_c	磁轭热容
C_3	除双金属片、加热体及磁轭外断路器内部零件的总热容
C_4	断路器外壳内外壁之间的塑料层的热容

为了计算简便，并且热路计算的重点为双金属片的发热及动作时间，在进行热路计算时仅将加热体当作唯一热源。加热体的损耗功率 P_j 可由加热体的电阻和流过加热体的电流求得

$$P_j = I^2 \rho_m \frac{l_j}{b_j \delta_j} \times 10^3 \quad (2.4-15)$$

式中： I 为加热体通过电流，A； ρ_m 为母线的电阻率， $\Omega \cdot m$ ；

l_j 、 b_j 、 δ_j 分别为加热体的长度、宽度和厚度, mm。

4.5.2 热路参数的计算

4.5.2.1 加热体、双金属片与磁轭的热阻

加热体、双金属片与磁轭之间的热量是通过平板方式进行传递, 因而可采用平板传热阻公式来计算

$$R_T = l/A\lambda \quad (2.4-16)$$

式中: l 、 A 、 λ 分别为平板的长度、垂直于导热方向的面积和导热系数。

根据式 (2.4-16), 取加热体的导热系数为 $\lambda_j = 24.8 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 可得加热体的热阻为

$$R_1 = \frac{\delta_j}{l_j b_j \times 10^{-3} \lambda_j \times 2} \quad (2.4-17)$$

双金属片材料为 5J20110, 形状为梯形。其尺寸为长 l_s , 上底宽 b_{s1} , 下底宽 b_{s2} , 厚 δ_s , 尺寸单位为 mm。加热体与双金属片的接触部位上底宽为 b_{js} (mm)。双金属片的热阻也可由式 (2.4-16) 求出。取双金属片的导热系数为 $22 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 则

$$R_s = \frac{\delta_s \times 2}{l_j (b_{js} + b_{s2}) \times 10^{-3} \lambda_s} \quad (2.4-18)$$

磁轭通过衔铁支架与加热板紧密接触, 磁轭长为 l_c , 宽为 b_c , 厚为 δ_c , 尺寸单位为 mm。衔铁支架厚为 δ_z (mm), 与加热板接触面积为 S_z (mm²)。磁轭和支架材料均为冷轧钢板, 取其导热系数为 $\lambda_c = 22.8 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 则

$$R_c = \frac{\delta_z}{S_z \lambda_c \times 10^{-3}} + \frac{\delta_c}{l_c b_c \times 10^{-3} \lambda_c} \quad (2.4-19)$$

$$R_2 = (R_s R_c) / (R_s + R_c) \quad (2.4-20)$$

4.5.2.2 其他热阻

双金属片及磁轭到断路器外壳内壁之间的空气及断路器内部零件的总热阻 R_3 、断路器外壳内外壁之间的塑料层的热阻 R_4 及断路器外壳外壁对流热阻 R_5 可由分析公式计算, 也可由实验确定。由于断路器内部结构复杂, 这里由样机或结构相近的样机实验确定。实验时, 在临界电流下, 分别用热电偶测量双金属片和断路器外壳的内外壁的稳定温升, 它们是 τ_g 、 τ_n 和 τ_w , 临界电流条件下加热体功率为 P_j 。

热阻 R_3 、 R_4 、 R_5 可由式 (2.4-21)、式 (2.4-22)、式 (2.4-23) 求得

$$R_3 = (\tau_g - \tau_n) / P_j \quad (2.4-21)$$

$$R_4 = (\tau_n - \tau_w) / P_j \quad (2.4-22)$$

$$R_5 = \tau_w / P_j \quad (2.4-23)$$

以上各热阻值单位为 K/W。

4.5.2.3 热容参数

发热体的热容 C 为物体质量 m 和比热容 c 的乘积, 即

$$C = mc \quad (2.4-24)$$

加热体的密度 γ_j 为 $8.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 比热容 c_j 为 $343 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。加热体的热容计算为

$$C_1 = l_j b_j \delta_j \gamma_j c_j \times 10^{-6} \quad (2.4-25)$$

双金属片的密度 γ_s 为 $7.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 比热容 c_s 为 $470 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。双金属片的热容计算如下

$$C_s = l_s (b_{s1} + b_{s2}) \delta_s \gamma_s c_s \times 10^{-6} / 2 \quad (2.4-26)$$

磁轭的密度 γ_c 为 $7.75 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 比热容 c_c 为 $470 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。磁轭的热容还包括衔铁支架部分的热容, 计算如下

$$C_c = (l_c b_c \delta_c + \delta_z S_z) \gamma_c c_c \times 10^{-6} \quad (2.4-27)$$

$$C_2 = C_s + C_c \quad (2.4-28)$$

C_3 和 C_4 的计算比较困难。为了计算简便, 在进行热路计算时仅将加热体当作唯一热源。但实际上断路器工作时, 不仅仅是加热体发热, 软连接、动静触头、进线端母线、都会产生热量。它们共同对断路器内部零件的温升产生影响。加热体占有所有热源总和的百分比为 16.6%。断路器内部结构复杂。零件材料主要为铜、冷轧钢板和塑料。铜的比热容小, 为 $386 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。冷轧钢板的比热容为 $470 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。塑料的比热容大, 为 $1100 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。但铜和冷轧钢板的质量比塑料大得多。断路器内部零件除加热体、双金属片及磁轭外的总质量为 $m_n = 0.14 \text{ kg}$, 取综合比热容为 $c_n = 600 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

$$C_3 = m_n c_n \times 0.166 \quad (2.4-29)$$

断路器外壳为塑料, 质量 $m_k = 0.29 \text{ kg}$, 比热容 $c_k = 1100 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 则

$$C_4 = m_k c_k \times 0.166 \quad (2.4-30)$$

电磁铁等效热路的热容的单位为 J/K。

4.5.3 断路器等效热路的求解与计算结果的实验对比

令 $G_1 \sim G_5$ 分别为 $R_1 \sim R_5$ 的倒数, 运用电路理论中的节点法, 可得断路器等效瞬态热路节点温升方程为

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\tau_1}{dt} = -G_2 \tau_1 + G_2 \tau_2 + P \\ C_2 \frac{d\tau_2}{dt} = G_2 \tau_1 - (G_2 + G_3) \tau_2 + G_3 \tau_3 \\ C_3 \frac{d\tau_3}{dt} = G_3 \tau_2 - (G_3 + G_4) \tau_3 + G_4 \tau_4 \\ C_4 \frac{d\tau_4}{dt} = G_4 \tau_3 - (G_4 + G_5) \tau_4 \end{cases} \quad (2.4-31)$$

用四阶龙格-库塔法求解微分方程组。同时可求出断路器的冷态动作特性, 即双金属片的动作时间。程序流程如图 2.4-17 所示。

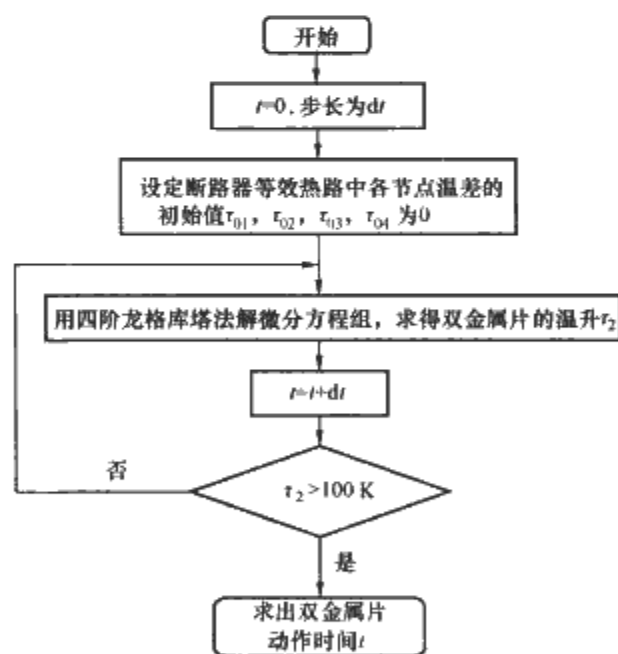


图 2.4-17 断路器热脱扣器冷态动作时间计算流程

根据前面的计算方法和原理, 编制了相应的仿真软件。编程语言采用 Windows 2000 平台上使用的 Visual C++ 编程环境。系统可进行塑壳断路器的热脱扣器冷态动作特性的计算。系统功能实现主要包括以下几个模块:

- (1) 双金属材料参数的选择: 建立了双金属材料库。通过菜单控制, 实现材料的选取、添加、修改和删除。
- (2) 热脱扣器尺寸参数与控制参数的输入。
- (3) 热脱扣器冷态动作特性的计算。
- (4) 断路器热脱扣器冷态动作特性曲线的绘制。

图 2.4-18 为通过仿真获得的断路器热脱扣器冷态动作特性曲线，计算结果与试验结果的对比如图 2.4-19 所示。

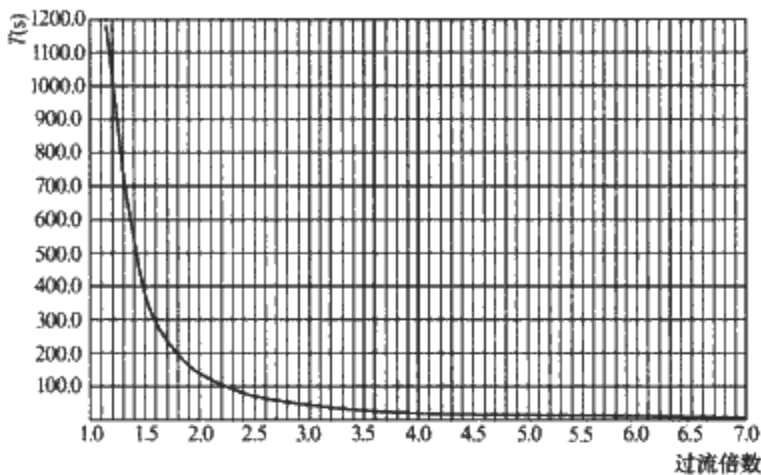


图 2.4-18 断路器热脱扣器冷态动作特性曲线
材料：5J20110；额定电流：190A

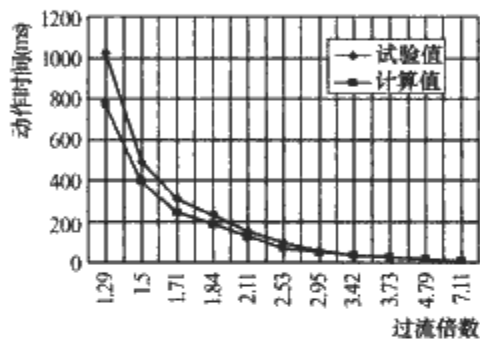


图 2.4-19 塑壳断路器试验值与
热路法计算值的比较

可以看出，在大过载电流时，计算值与实验值比较吻合。而当过载电流小时，计算值误差较大。这是因为，当过流倍数大时，由于热脱扣器动作快，热量还来不及散出，只需考虑双金属片的热特性，断路器内部的其他部件的吸热和散热对双金属片温升的影响很小。当过流倍数小时，热脱扣器动作时间长，热交换可充分进行。双金属片周围物体的热阻和热容对双金属片的散热有明显的影响。并且断路器内的热源不仅仅是加热体，而在计算时仅将加热体当作唯一热源，将热容参数按比例算出，导致计算结果误差大。

5 断路器机构动态特性的仿真与优化设计

断路器操动机构的动作速度与断路器开断特性有很大关系，断路器操动机构动作速度越快，电弧拉长得越快，使电弧容易进入栅片，电弧停滞时间也越短，提高了电弧电压增长速度，对限流断路器来说，操动机构动作越快，有利于动触头斥开过程与机构动作的合理配合，防止动触头跌落和熔焊现象。这一节以塑壳断路器操动机构为研究对象进行动力学仿真与以动作速度最快为目标的优化设计。

5.1 低压塑壳断路器机构动态特性仿真分析

5.1.1 低压塑壳断路器操作机构简介

取研究对象是为额定电流为 250A 某型号低压限流式塑壳断路器，如图 2.4-20 所示。其操动机构是典型的五连杆机构，其分合闸过程是一个瞬间的动作过程，包含高速的碰撞，涉及因素较多，故要精确建模。机构的结构简图如图 2.4-21 所示，它由触头支架 f、下连杆 g、上连杆 h、跳扣 k、锁扣 m、操作手柄 1 和分断弹簧 2 等部分组成。触头转

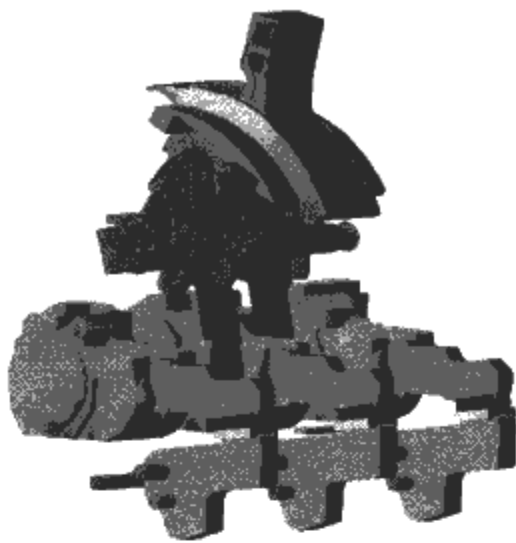


图 2.4-20 仿真模型的放大图

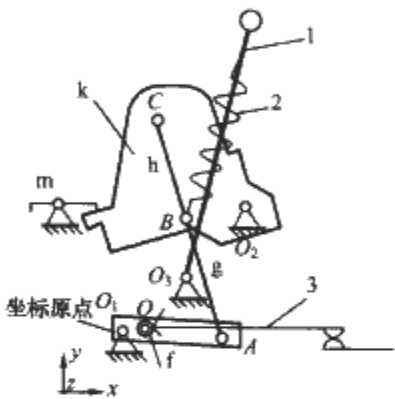


图 2.4-21 MCCB 操动机构结构简图
1—操作手柄；2—分断弹簧；3—动触头臂；f—触头支架；
g—下连杆；h—上连杆；k—跳扣；m—锁扣

轴 O 上的扭簧约束了动触头臂和触头支架的相对运动。当处于图示合闸位置时，分断弹簧 2 虽有储能，但因连杆 g 和连杆 h 处于挺直状态（死区位置），C 点固定不动，杆 g、杆 h、触头支架 f 和机构构成四连杆机构，处于稳定静止状态，此时触头完全闭合。手动分闸时，分断弹簧随着手柄的转动被伸长储能，当弹簧力的作用线与上连杆重合时，处于最大位能状态，一旦超过上连杆，B 点向左运动脱离死区，触头支架被下连杆迅速上提，绕主轴 O₁ 转动，从而带动动触头向上运动而分断。在短路电流到来而脱扣器未动作之前，如果电动斥力足够克服触头预压力和触头重力，动触头可被斥开一定的角度，当短路电流引起锁扣 m 转动，在分断弹簧作用下，跳扣 k 绕 O₂ 轴顺时针转动，C 点成为活动点，同时连杆 g、h 脱离死区，于是变成五连杆机构。因为五连杆机构有两个自由度，触头继续分断，同手柄位置无关。

5.1.2 操动机构仿真模型的建立

在常用的三维实体造型软件如 Solid Works、UG 和 PRO/E 等中建立的模型，可通过 Adams 提供的图形接口模块 EXCHANGE 将其导入，但导入模型的弊端在于其尺寸不能改变，不便于研究构件形状对机构性能的影响。该型号断路器操动机构的结构比较复杂。考虑到所关心的问题及仿真的方便，对其作适当简化，将从 UG 导入的低压塑壳断路器操动机构和触头系统的模型进行了删减，在 Adams/View 中重新建立了关键构件的模型，如上下连杆、主弹簧和触头扭簧。从程序的求解原理来看，只要仿真构件几何形体的质量、质心位置、惯性矩和惯性积同实际构件相同，仿真结果是等价的。建模过程所用到的一些重要参数如表 2.4-7 所示。

表 2.4-7 建模过程中用到的参数值

主弹簧 (分断弹簧)	刚度系数 (N/mm)
	自由长度 (mm)
	合闸位置拉力 (N)
	分闸位置拉力 (N)
动触头扭簧	刚度系数 (N/mm)
	初始角度 (°)
	合闸位置变形角度 (°)
	合闸位置扭矩 (N·mm)
静触头扭簧	刚度系数 (N/mm)
	初始角度 (°)
	合闸位置变形角度 (°)
	合闸位置扭矩 (N·mm)

建模过程中应注意的关键之处如下：

- (1) 动力的合理施加。在短路故障发生后，短路电流流经低压断路器时，触发其脱扣机构，机构在此分闸过程的驱动力主要来自于分断弹簧，其输出特性决定了分闸过程主要参数的值（如刚分速度、平均分闸速度、分闸时间等）。由于弹簧的输出力特性由刚度系数和预作用力以及预作用力下的长度决定，因此只要准确定义这三个参数即可。
- (2) 反力的合理施加。决定断路器分合闸特性的不仅有驱动力的大小，还与机构中存在的众多的反力有关。这其中包括动触头重力、触头弹簧的反力以及各运动部件之间的摩擦力等。
- (3) 约束关系。操动机构中的约束关系包括固定约束 (fixed joint)、转动约束 (revolute joint) 和碰撞 (contact) 等。约束关系的添加要充分考虑实际操动机构中可能存在的约束，遗漏任何一个约束关系都会严重影响到输出结果。

(4) 仿真过程的控制。考虑到仿真过程的方便性以及仿真结果的直观性，结合操动机构运动特点，对断路器分合闸过程分别建模，分闸过程的起始时刻对应三相触头处于闭合状态，合闸过程的起始时刻对应三相触头分开状态。在 Adams 中，为了实现对仿真过程的控制，需要添加传感器 (sensor)，并用它来控制仿真过程的自动终止。在计及电动斥力作用时，需采用模拟描述控制来启动或停止执行仿真过程中的电动力的施加。

5.1.3 仿真模型的试验验证

为了确定仿真模型是否符合实际情况，与塑壳断路器样机的物理特性是否一致。本文设计了一组试验，分别测试了断路器手动分合闸和短路分断过程中主轴角位移曲线。试验中采用 WDD35D4 型精密导电塑料角位移传感器测量角位移。测量角位移的试验线路如图 2.4-22 所示，角位移传感器是通过轴套与断路器触头支架的主轴相连的。

在 Adams 中通过添加测量 (measure) 来测试仿真模型的参数。图 2.4-23 给出了手动分断过程触头支架主轴角度变化仿真与实测曲线对比结果，机构动作时间约为 9ms。从图 2.4-23 可以看出，仿真模型的输出曲线跟实际样机的输出曲线吻合得较好，证明了仿真模型的正确性。由于动触头

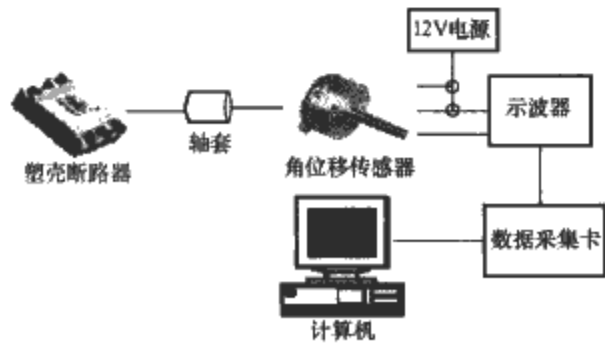


图 2.4-22 测量角位移的试验线路

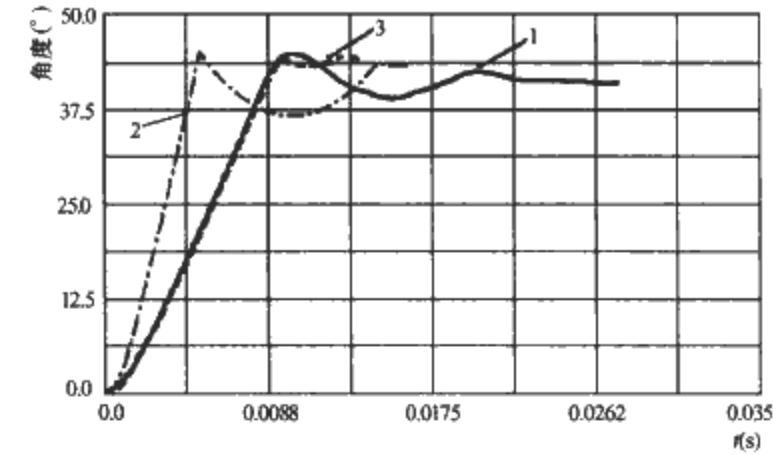


图 2.4-23 手动分断过程中仿真与实测曲线的对比
1—实测曲线；2—不考虑摩擦力的仿真曲线；
3—考虑主轴摩擦力后的仿真曲线

臂到达最大角度与挡块碰撞后，造成曲线最后阶段的起伏变化。考虑到关心的主要是断路器机构的分断速度，对触头臂与挡块碰撞后的运动不作深入研究。因此，以动触头臂运动到最大角度为仿真结束时刻。

5.2 低压塑壳断路器机构优化设计

5.2.1 影响断路器分断速度的主要因素

提高分断能力及其使用寿命一直是低压断路器研究的一个重点内容，可以通过改进灭弧室结构提高灭弧能力、优化与改进操动机构和缩短触头弹跳时间等方法来达到提高分断性能的目的。在分断过程中，触头的分断速度主要影响电弧电压上升速度，电弧停滞时间和电弧进入栅片的快慢。因此，以提高主轴的平均角速度为目的，进行机构的优化设计，对提高断路器开断性能有重要作用。在对机构优化前，先来分析一些影响断路器操动机构分断速度的主要因素，它们是分断弹簧的刚度和杆件形状。

增大主弹簧的刚度系数可以提高断路器的分断速度。图 2.4-24 和图 2.4-25 分别为分断弹簧不同刚度系数下的主轴角位移和角速度随时间的变化曲线，曲线 1~曲线 3 刚度系数 (N/mm) 分别为 17.5, 27.5, 37.5，主轴转到最大角度所用时间 (ms) 分别约为 10.7, 9, 8。可见，增大弹簧刚度可提高触头打开速度，但手动分合闸所需的力也会随弹簧刚度增大而增加。仿真表明：在系数为 17.5N/mm 时，所需的闭合力为 30N 左右；在 37.5N/mm 时，闭合力为 60N 左右。可见，主弹簧刚度系数的提高能增大机构的开断速度，但同时增加了手动分合闸所需操作力，因而弹簧刚度的增加受到断路器手动操作力增大的约束。

在参数化分析过程中，Adams/View 采用不同的设计参

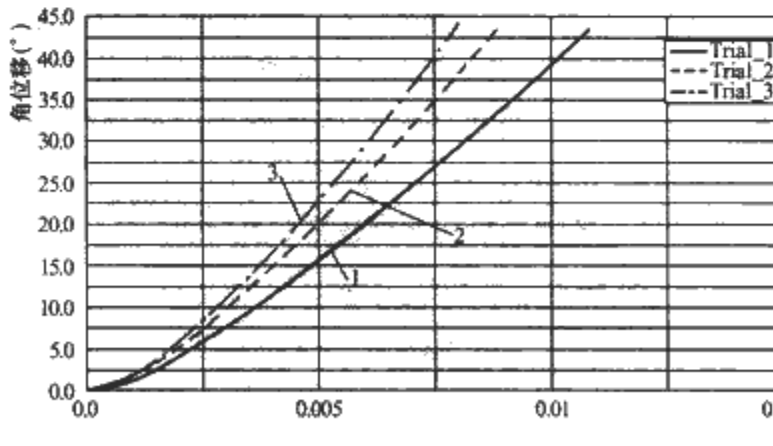


图 2.4-24 不同弹簧刚度系数操动机构
主轴角位移随时间的变化曲线

1—17.5N/mm；2—27.5N/mm；3—37.5N/mm

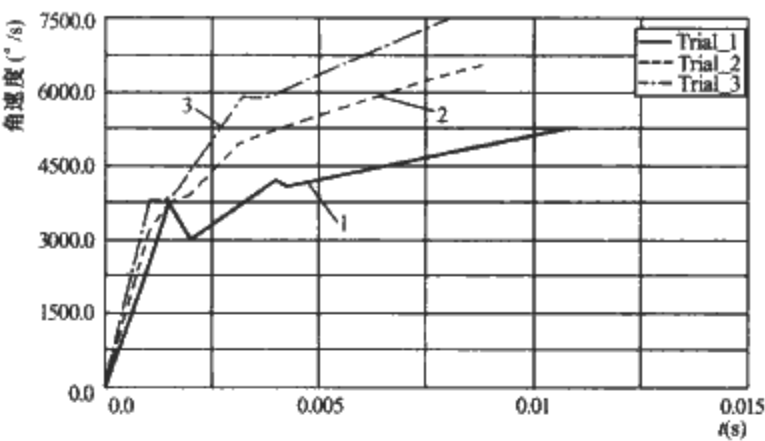


图 2.4-25 不同分断弹簧刚度系数操动机构
主轴角速度随时间的变化曲线
1—17.5N/mm; 2—27.5N/mm; 3—37.5N/mm

数值, 自动地运行一系列的仿真分析, 然后返回分析结果。通过对结果的分析, 可以研究一个或多个参数变化对样机性能的影响, 获得最危险的操作工况以及最优化的样机。类似于实际物理样机的设计、试验和优化过程, Adams 提供了参数化分析方法——设计研究, 是在特定范围内对某个设计变量设置不同的若干值, 进行一系列的自动仿真分析, 各次的分析结果以报告形式列出, 通过设计研究结果可知:

- (1) 在设计变量变化过程中虚拟样机性能的变化情况。
- (2) 在给定分析范围内找到设计变量的最佳参数值。
- (3) 设计变量对虚拟样机性能的近似敏感度。敏感度是前后两次试验中设计敏感度的平均值, 该值可以表示为 S_i

$$S_i = \frac{1}{2} \left(\frac{Q_{i+1} - Q_i}{V_{i+1} - V_i} + \frac{Q_i - Q_{i-1}}{V_i - V_{i-1}} \right) \quad (2.4-32)$$

式中: Q 为目标值; V 为设计变量的数值; i 为迭代次数。
可以通过敏感度值了解某个参数在变化时对目标函数的影响程度。敏感度为正值, 表示目标值在迭代过程中逐渐增大, 反之亦然。

在 Adams 中, 刚体的运动状态是根据构件质心在计算坐标系的位置, 采用修正的 Newton-Raphson 迭代算法迅速分析求解。虽然不同型号的低压断路器操动机构的原理相同, 但是杆件形状却有很大不同。图 2.4-26 是直角坐标系

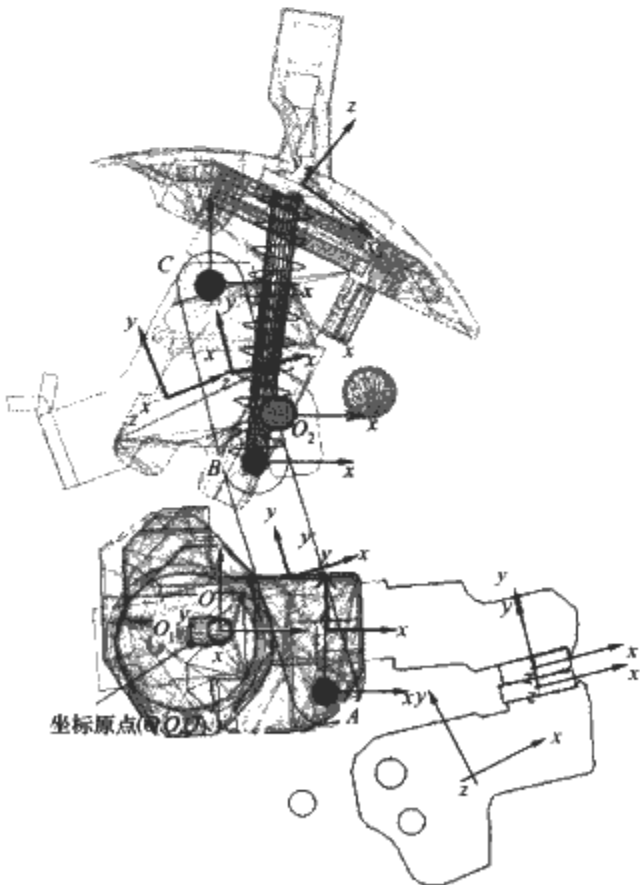


图 2.4-26 直角坐标系下的塑壳断路器机构模型

下的塑壳断路器机构模型, 触头支架旋转轴 O_1 作为主轴是直角坐标系原点, 轴 A、轴 B、轴 C 和轴 O_2 是操动机构关键轴。改变杆件形状相当于改变杆件的质心位置和质量, 因此, 将跳扣 k、上连杆 h、下连杆 g、触头的质量和质心 x 、 y 坐标设为变量, 进行设计研究, 研究它们对主轴分断角速度的影响。表 2.4-8 为杆件质量的设计研究结果, 表 2.4-9 为杆件质心位置的设计研究结果。

表 2.4-8 杆件质量设计研究结果

设计变量	含 义	初始值 (g)	变化范围 (g)	敏感度
DV_9	跳扣质量	13.249 840 810 7	-5, 5	-16.405
DV_10	上连杆质量	5.814	-2, 2	-39.203
DV_11	下连杆质量	5.111	-2, 2	4.991 6
DV_12	动触头质量	13.735 757 913 8	-5, 5	-23.616

表 2.4-9 杆件质心位置设计研究结果

设计变量	含 义	初始值 (mm)	变化范围 (mm)	敏感度
DV_13	跳扣质心 x 坐标	4.366 606 847 7	-1.5, 1.5	71.202
DV_14	跳扣质心 y 坐标	22.713 387 273 3	-1.5, 1.5	-5.468 6
DV_15	上连杆质心 x 坐标	2.951 077 867	-1.5, 1.5	1.806 9
DV_16	上连杆质心 y 坐标	22.480 708 942 9	-1.5, 1.5	-25.416
DV_17	下连杆质心 x 坐标	5.534 895 795 1	-1.5, 1.5	-3.837 9
DV_18	下连杆质心 y 坐标	7.177 482 814	-1.5, 1.5	3.344 4
DV_19	动触头质心 x 坐标	6.608 976 016	-1.5, 1.5	-18.229
DV_20	动触头质心 y 坐标	-7.742 900 255 3	-1.5, 1.5	26.741

从表 2.4-8 和表 2.4-9 中可以看出:

- (1) 跳扣的质心位置 x 坐标对触头主轴平均角速度影响最大, 它的质心 x 坐标离图 2.4-26 中的 O_1 轴 (坐标原点) 越远, 角速度越大, 在设计时, 应在不影响机构运动的情况下, 通过改变它的形状使质心位置尽量远离触头主轴中心点 O_1 , 它的质量也有较大影响。
- (2) 上连杆的质量影响最大, 质心 y 坐标也有较大影响, 应注意采取适当措施, 减轻其质量。
- (3) 动触头质心的坐标和质量也有一定影响, 不能忽视。
- (4) 下连杆质心位置和质量影响最小。

5.2.2 以关键轴的位置作为设计变量的操动机构优化设计

优化设计是 Adams 提供的一种复杂的分析工具。优化分析问题可归结为: 在满足各种设计条件和在指定的变量变化范围内, 通过自动地选择设计变量, 由分析程序求取目标函数的最大值或最小值。优化的目标函数是一个数值表达式, 可以表示质量、效率、总材料成本、运行时间和所需的能量等, 可以选择在优化分析中是求取最大值还是最小值。设计变量可以是构件的质量、几何尺寸和力的大小等。优化分析中的约束是有条件的, 这些边界条件能够直接或间接地消除无法接受的计算结果。

Adams 软件内嵌的优化算法有 DOT 优化算法, OPT-DES 算法, 这些算法已得到了世界范围内的广泛认可, 对用户而言, 进行优化设计只需要确定收敛容差和最大迭代次数即可。此外, 用户还可自编写优化算法嵌入到 Adams 中。本书对断路器机构优化设计所选用的优化算法是 OPTDES-GRG (Generalized Reduced Gradient) 算法。

以图 2.4-26 中的触头主轴 O_1 为参考点, 操动机构关键轴 A、B、C、 O_2 的中心 x 、 y 坐标为设计变量, 进行设计研究。设置设计变量的变化范围如表 2.4-10 所示, 观察每个变量对平均分断角速度的影响。

表 2.4-10 轴的位置设计研究结果

设计变量	含 义	初始值 (mm)	变化范围 (mm)	在初始值时的 敏感度
DV_1	O ₂ 轴 x 坐标	10.295	-1.5, 1.5	312.68
DV_2	O ₂ 轴 y 坐标	26.010	-1.5, 1.5	123.19
DV_3	C 轴 x 坐标	2.665 2	-1.5, 1.5	126.60
DV_4	C 轴 y 坐标	41.193	-1.5, 1.5	11.365
DV_5	B 轴 x 坐标	7.764 0	-1.5, 1.5	-141.60
DV_6	B 轴 y 坐标	20.821	-1.5, 1.5	-551.58
DV_7	A 轴 x 坐标	15.776	-1.5, 1.5	136.42
DV_8	A 轴 y 坐标	-5.799 2	-1.5, 1.5	7.067 5

以轴 O₂ 的 x 坐标变化为例, 在表 2.4-10 变化范围内, 当轴 O₂ 离坐标原点 O₁ 最近时, 触头转轴达到最大角度所需时间为 10.73ms, 当其离坐标原点 O₁ 最远时, 到达触头主轴最大角度所需时间为 8.89ms。

从表 2.4-10 中可以看出, 变量 DV_1、DV_3、DV_6、DV_7 的敏感度相对较大, 即轴 O₂、C、A 中心的 x 轴坐标和轴 B 中心的 y 轴坐标对分断过程中动触头主轴平均角速度影响较大。这一结论为进一步优化设计奠定了基础。

以触头主轴的平均角速度最大为目标函数, 设计变量在指定的范围内变化。在优化过程中, Adams 自动调整设计变量, 以获得最佳目标函数值。表 2.4-11 为考虑 DV_1、DV_3、DV_6、DV_7 四个变量时机机构的优化分析结果。

表 2.4-11 优化设计结果

函数值	平均角速度 (°/s)	DV_1 (mm)	DV_3 (mm)	DV_6 (mm)	DV_7 (mm)
初始值	4825.22	10.295	2.665 16	20.821 3	15.775 9
优化值	5566.4	11.775 6	4.165 16	19.321 3	15.705 1

从表 2.4-11 可以看出, 在考虑四个变量同时变化的情况下, 经过优化设计的迭代运算, 找到每个变量的最优点, 使动触头主轴的运动速度从 4825.22°/s 提高到 5566.4°/s, 所用时间由 9ms 缩短到 7.753ms, 并能自动生成新的样机模型。在分断过程中, 优化前后的动触头主轴角速度随时间变化的曲线如图 2.4-27 所示。

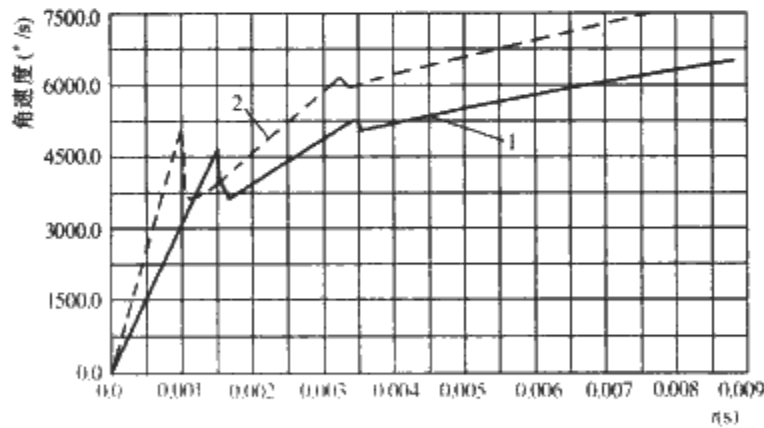


图 2.4-27 优化前后的动触头主轴角速度变化
1—优化前; 2—优化后

表 2.4-12 是优化前后一些仿真结果对比情况, 仿真研究表明, 一般需在手柄施加 43N 的力才能该型号塑壳断路器合闸, 机构优化后最小合闸力减小到 39N, 刚分速度由原来的 1.15m/s 提高到 2.08m/s, 说明了优化结果是合理可取的。

表 2.4-12 优化前后结果对比

仿真值	平均角速度 (°/s)	触头主轴到达 最大角度所需时间 (ms)	手动合闸力 (N)	刚分速度 (m/s)
优化前	4825.22	9	43	1.15
优化值	5566.4	7.753	39	2.08

6 断路器的电动斥力和气动斥力

6.1 电动斥力的数值分析方法

电动斥力的大小决定了断路器工作过程中的电动稳定性、热动稳定性以及断路器的开断性能, 因此, 在断路器优化设计中电动斥力的计算与分析是一项很重要也很必要的内容。

断路器在工作时, 作用在动触头上的电动斥力包括两部分: 由于电流线收缩引起的 Holm 力 F_H 和由于导电回路引起的 Lorentz 力 F_L 。对 F_H 的研究, 主要是如何描述触头间的电接触情况; 同时, 伴随着电磁场数值计算理论及相关技术的发展, 对复杂电气结构下的电动斥力进行较为精确的分析也成为可能。目前, 积分方程法和有限元法是断路器中的电动斥力分析的常用方法。

对于电器中电动斥力的计算, 关键是求解流过导体的电流密度 J 和载流导体上的磁感应强度 B , 然后采用式 (2.4-33) 就可以求得磁场对载流导体的电动力。其中 V 为载流导体的体积。

$$F = \int J \times B dV \tag{2.4-33}$$

6.1.1 积分方程法

设在磁场中的有一场点 $P(x, y, z)$, 则 P 点的磁场强度 $H(r)$ 可认为是由两种场源引起的: 一是空间电流的作用产生的磁场 $H_s(r)$, 它由电流的大小、分布和场点位置决定; 二是磁化后的铁磁物质产生的磁场 $H_m(r)$, 它的大小决定于铁磁物质与场点 P 的相对位置和铁磁物质的磁化强度 M 。于是空间任一场点 P 处的磁场强度可表示为

$$H(r) = H_s(r) + H_m(r) \tag{2.4-34}$$

电流的三维分布一般都具有比较复杂的几何形状, 难以找到统一的积分表达方式, 所以对于 $H_s(r)$ 的求解, 通常是将不规则的三维结构剖分成几种基本电流单元, 如楔形块、部分螺旋管块和长方体块等。空间中任一点的场值看成是这些基本块所产生场的叠加。同时, 对电流源区采用分区剖分的方法, 使得每一个分区具有常值电流密度分布。

电流与铁磁物质之间、铁磁物质相互之间形成一个十分复杂的非线性关系。电流流过导体在空间产生磁场, 电流磁场引起场区内的铁磁物质磁化, 而铁磁物质的磁化又在空间各场点叠加新的场强, 这个场强不仅影响到场区其他的铁磁物质, 同时也影响到本身。而积分方程法求解磁场问题的基本思想就是认为空间中的任何一点的磁场是由电流源磁场和介质被磁化所产生的磁场的叠加。

对图 2.4-28 所示的存在电流源和铁磁物质的空间源区来说, 式 (2.4-35) 所示的毕奥—萨伐定律可以描述由于源

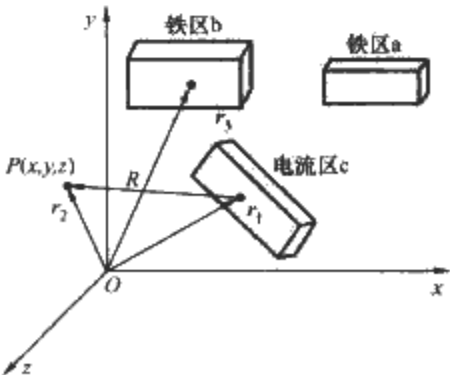


图 2.4-28 空间源区分布

点 r_1 处电流 J 的存在, 在空间某点 r_2 处所产生的磁场强度 H_s 与电流 J 的大小、方向和分布之间的关系。通过对电流源区进行积分, 可求得场区任一点的 H_s 值。而式 (2.4-36) 所示的积分方程可以描述铁磁物质由于磁化所产生的磁场。

在求解式 (2.4-36) 时, 需要将铁区剖分为许多小块铁单元, 每一块单元的物质参数和磁化强度可取不同的数值, 但在每一个单元内部物质参数和磁化强度都被看成是一个常量。这样, 一个参数连续变化的铁区就被一个离散了的并具有不同物质参数的许多小铁块单元代替。这种剖分的概念和有限元法是类似的。从式 (2.4-36) 中可以看出, 由于离散, 被积函数中的磁化强度矢量 M 在单元中已成常量, 故可以提到积分号之外, 剩下的被积函数表达式中只与铁单元的几何尺寸及铁单元与场点之间的距离有关。这样, 就有式 (2.4-37) 成立, 同时, 磁化强度 M 可以通过磁化率 χ 与磁场强度 H 的乘积来表示, 如式 (2.4-38) 所示。这样, 对与图 2.4-28 所示的场区可得到式 (2.4-39) 所示的联立方程, 其中 $C_{aa}, C_{ab}, C_{ba}, C_{bb}$ 均是仅于场域中各部分几何尺寸和相互位置有关的耦合系数。

图 2.4-29 为利用积分方程法编写程序的基本框图。首先假定一个磁化率 χ_0 , 按不同的几何形状和尺寸进行计算, 形成系数矩阵, 并计算电流所产生的场量构成方程右端项。然后求解大型联立方程组, 方程的解就是磁场强度在各方向上的分量。由此查磁化曲线, 得到新的磁化率 χ_1 , 检查 χ_1 和 χ_0 之间的误差是否小于给定的误差。如已满足精度要求, 则输出计算结果; 若不满足, 则将 χ_1 回代至系数形成部分。这个过程反复迭代进行, 直到达到所要求的精度为止。

$$H_s = \frac{1}{4\pi} \int_{v_1} J(r_1) \frac{r_2 - r_1}{|r_2 - r_1|^3} dv \quad (2.4-35)$$

$$H_m = -\frac{1}{4\pi} \int_v \nabla \left(M \frac{r_2 - r_3}{|r_2 - r_3|^3} \right) dv \quad (2.4-36)$$

$$H_m = C_{r_2 r_3} M \quad (2.4-37)$$

$$M = \frac{B}{\mu_0} - H = \frac{\mu H}{\mu_0} - H = \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) H = \chi H \quad (2.4-38)$$

$$\begin{cases} H_a = H_{sa} + C_{aa}M_a + C_{ab}M_b \\ H_b = H_{sb} + C_{ba}M_a + C_{bb}M_b \end{cases}$$

$$\begin{cases} (C_{aa}\chi_a - 1)H_a + C_{ab}\chi_b H_b = -H_{sa} \\ C_{ba}\chi_a H_a + (C_{bb}\chi_b - 1)H_b = -H_{sb} \end{cases} \quad (2.4-39)$$

即

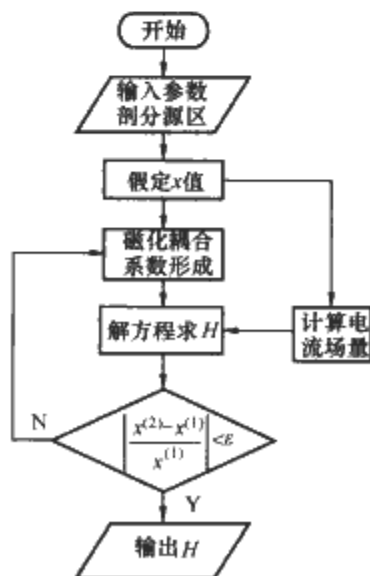


图 2.4-29 积分方程法的程序框图

6.1.2 有限元法

根据静态电磁场的分析, 在导体区域, 也就是触头导电回路, 电流密度 J 满足式 (2.4-40) 和式 (2.4-41) 所示的公式。

$$E = -\nabla V, J = \sigma E \quad (2.4-40)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (2.4-41)$$

式中: σ 为导体的电导率; E 为电场强度; U 为标量电动势; J 为电流密度矢量。

在得到了电流密度 J 的分布后, 在整个场域中, 根据磁通密度 B 和 J 之间的关系式 (2.4-42) 即可得到 B 的分布。

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J, B = \nabla \times A \quad (2.4-42)$$

式中: A 为矢量磁位; μ 为磁导率。

6.2 气动斥力的实验与计算

当短路电流到来时, 在动、静触头尚未分离的起始阶段, 作用在触头上的电动斥力包括导电回路产生的 Lorentz 力 F_L 和触头间的电流收缩引起的 Holm 力 F_H , 其本质上是电磁力。然而, 一旦电动斥力的数值超过触头预压力, 动、触头即斥开并在触头间产生电弧。此后, Holm 力即消失, 然而与此同时, 由于电弧与电极、器壁等之间的相互作用, 会在动触头上作用另外一个力, 称之为气动斥力 F_B , 其方向和动触头的运动方向相同。气动斥力可用式 (2.4-43) 所示的简单公式来描述

$$F_B = \Delta p A_c \quad (2.4-43)$$

式中: Δp 为净压力; A_c 为动触头的表面积。

对于低压限流断路器来讲, 一般情况下, 触头先于机构开始动作, 这样气动斥力对于触头斥开后的进一步运动起着重要的作用, 从而影响断路器的开断能力和限流性能。

6.2.1 气动斥力的实验研究

对一具有灭弧室的双断点结构模型, 采用频率为 50Hz 的大容量振荡回路提供短路电流, 研究了气动斥力的作用规律。测量方法的原理如图 2.4-30 所示。动导电杆通过螺丝固定在连接杆上的 A 点, 实验时模型水平放置, 初始时在一定的弹簧压力作用下, 动静触头闭合, 当短路电流到来后, 在电动斥力 F_L 和气动斥力 F_B 的作用下, 动触头开始运动, 连接杆的一端和位移传感器的测量杆相固定, 以测量动导电杆的运动位移 s 随时间的变化过程, 另一端通过弹簧和石英拉压传感器相连接, 可测量弹簧作用在其上的力 F_K , 两个连接端有一段距离 l , 这也是留给动导电杆的最大位移量。

这样, 作用在动导电杆上力就包括 F_L 、 F_B 和弹簧力

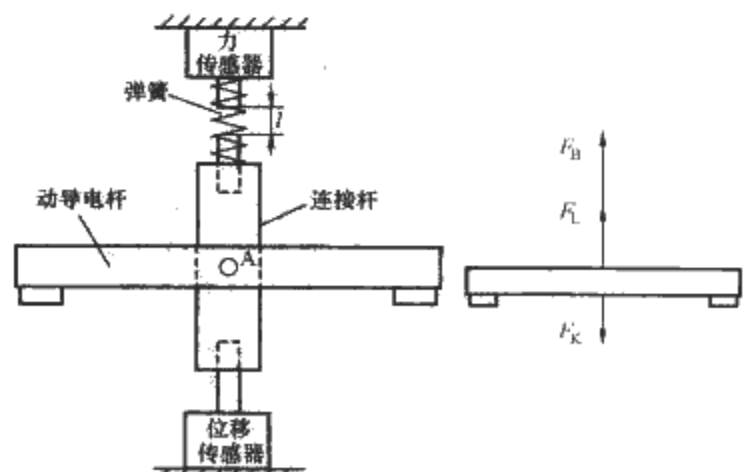


图 2.4-30 气动斥力测试方法的原理图

F_K ，且满足式(2.4-44)所示的关系式

$$F_L + F_B - F_K = m \frac{d^2 s}{dt^2} \tag{2.4-44}$$

式中： m 为连接杆、动导电杆等可动部分的质量。

根据实验中测量到的 s 和 F_K ，求解该方程，就可以得到 F_L 和 F_B 的合力值，也即 F 。此外，由于 F_K 仅与弹簧的刚度系数和长度的变化量有关，因此，力传感器并不是必需的。为了简化实验和克服摩擦力的影响，实验也可以在固定的动静触头间距条件下，采用熔丝引弧的方法，通过直接测量燃弧期间作用在动导电杆上的 F_L 和 F_B 的合力来完成。此

时，只要将连接杆的一端固定在力传感器的测量引出端即可。同时，采用有限元方法计算作用在动导电杆上的电动斥力 F_L ，从测量的结果中减去 F_L 就可以得到 F_B 。

以下给出采用FFT方法进行平滑处理后，不同电流、不同触头开距时，测量得到的合力达到峰值之前 $F_B/(ui)$ 随时间的变化曲线。图2.4-31为动、静触头间距 $s=2\sim6\text{mm}$ 时在不同预期短路电流作用下，单位功率产生的气动斥力 $F_B/(ui)$ 随时间的变化过程。图2.4-31中， I_m 为实际短路电流的峰值。

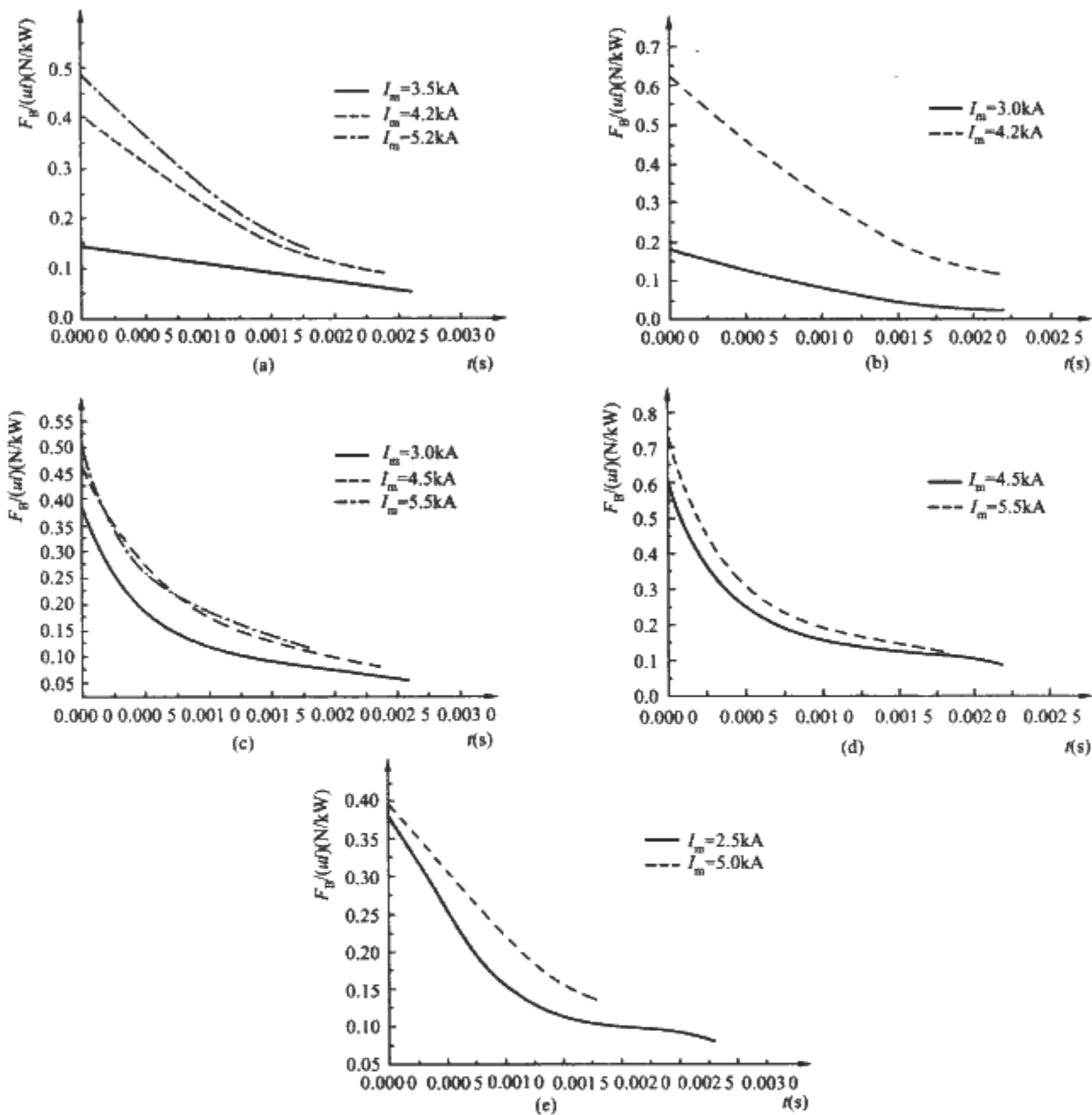


图 2.4-31 不同电流、不同间距时的 $F_B/(ui)$ 随时间的变化曲线
(a) $s=2\text{mm}$; (b) $s=3\text{mm}$; (c) $s=4\text{mm}$; (d) $s=5\text{mm}$; (e) $s=6\text{mm}$

从图 2.4-31 可以看出：
(1) 相同的触头间距和不同的预期电流时，随着短路电流峰值的增大，单位功率产生的气动斥力 $F_B/(ui)$ 随之增加；而且，当 I_m 超过 4kA 后，短路电流的增大对 $F_B/(ui)$ 的影响越来越小。
这表明电流上升速度的提高和相应的电弧输入功率的增加，使得电弧用于灭弧室内部压力升高的能量占电弧总能量的比例加大。而这一比例在一定的预期短路电流（本章为 5kA 预期短路电流有效值）时会达到一个稳定值。
(2) $F_B/(ui)$ 是燃弧时间的一个减函数，开始阶段下降速度较快，在 $1.0\sim1.5\text{ms}$ 后下降速度较缓慢，而且短路电流越大，下降的速度越快。
这是由于在燃弧过程中，电弧的运动使得灭弧室内部的压力不断的平衡，引起作用在动触头两侧的压力差降低。

图 2.4-32 为 $I_m=4.2\text{kA}$ 、触头间距分别为 2mm 和 3mm ，以及 $I_m=4.5\text{kA}$ 、触头间距分别为 4mm 和 5mm ， $F_B/(ui)$ 在不同时刻时的数值。从图中可以看出，在短路电

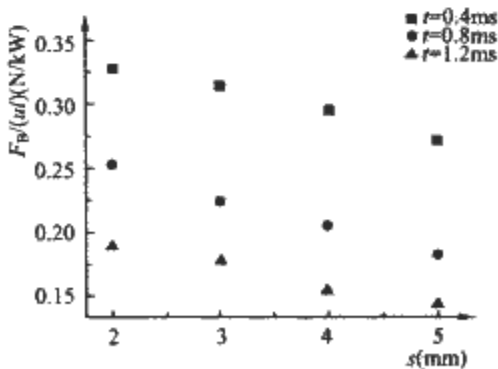


图 2.4-32 同等电流下、不同时刻时 $F_B/(ui)$ 随触头间距的变化

流相当的情况下,随着间距的增大, $F_B/(ui)$ 值有所下降,但是同燃弧时间相比,触头间距的影响较小。这也就是说压力的平衡过程对气动斥力的作用起着关键性的作用。

从该实验的结果可以看出,单位功率产生的气动斥力与时间和触头间距的变化过程比较类似,而同燃弧时间相比,与触头间距关系较小。同时,对于低压断路器来说,通常情况下能够使其动作的短路电流均在数千安以上。结合实验结果发现的短路电流有效值增加到4kA以上时 $F_B/(ui)$ 的特性非常接近的特点,因此,可从上述各组实验中选取一条较大电流时的结果作为气动斥力的特征曲线,作为参考数据来分析低压断路器的开断过程,称之为“特征曲线”。

6.2.2 气动斥力的计算方法

Shea 和 Zhou 结合实验,从理论上给出了气动斥力的分析和计算方法。他们的主要出发点均是电弧能量的70%是辐射耗散掉的,然后各自从能量平衡的角度建立了自己的分析模型。Shea 提出的方法的理论基础是:由于纯空气断路器电弧的电导率与压力和温度的关系已确定,只要知道电弧的温度和电导率,就可以通过插值得到电弧的压力。这样,根据 Stefan-Boltzman 公式以及能量平衡,有式(2.4-45)所示的关系成立。

$$\eta UI = \epsilon a A_s T^4, T = [\eta UI / (\epsilon a \pi L d)]^{1/4} \quad (2.4-45)$$

式中: η 为通过辐射消耗的能量占总电弧能量的比例; UI 为电弧的输入功率; ϵ 为辐射散射系数(对空气开关电弧来说,一般为0.1~1); a 为玻尔兹曼常数; A_s 为电弧的表面积; T 为电弧温度; L 和 d 分别为电弧长度和直径。

然后,根据欧姆公式可以写出电导率 σ 的表达式,如式(2.4-46)所示。这样,对一定的电弧电流和电压以及触头间距等条件下,就可以计算出电弧的温度和电导率,从而得到灭弧室内的压力值。

$$\sigma = IL / (UA_x) \quad (2.4-46)$$

式中: A_x 为电弧的截面积。

然而,Shea 利用该方法计算出温度及其对应的电导率值数据点并不能得到合理的压力结果,这直接影响了气动斥力的计算。他认为,这是由多种原因造成的,包括电弧的形状参数、辐射占电弧总能量的百分比以及散射系数的影响等。

针对这种情况,Zhou 对这个模型进行了改进,并提出了式(2.4-47)所示的经验公式。

$$F_B = \frac{\eta UA}{\epsilon_0 A_{arc} s} p_0 \quad (2.4-47)$$

式中: F_B 为气动斥力; ϵ_0 为一个大气压下的辐射散射系数; A_{arc} 为电弧或者灭弧室的截面积; s 为动静触头之间的距离; A 为触头的截面积; p_0 为一个标准大气压的值。

可以看出,气动斥力和电弧的输入功率及触头的截面积成正比例,而和灭弧室或者电弧的直径及触头开距成反比。但值得指出的是,在3000~8000A电流时,电弧温度一般为16500~18500K,这时与压力和温度有关的物理量 ϵ_0 一般可取为 $3 \times 10^{11} \text{ W/m}^2$ 。然而,在更为宽广的电流范围内,如何较为准确的估量气动斥力的数值,不是式(2.4-47)能够解决的问题。

6.3 塑壳断路器(MCCB)电动斥力计算及其应用

对于 MCCB 来说,动触头是在一个对转动轴的力矩 M 的作用下打开的,如图 2.4-33 所示。作用在其上的等效电动力可以通过式(2.4-48)求得。也就是说,对任何一个单

元 i 来说,其对于转轴 O 的转矩 T_i 为 d_i 和力密度 F_i 的向量积,那么在整个动导电杆区域对 T_i 进行体积分运算,则可得到作用在其上相对于 O 的力矩,力矩除以力臂 l 就可以得到等效电动力。

$$T = \int_V d_i \times F_i dv \quad F = T/l \quad (2.4-48)$$

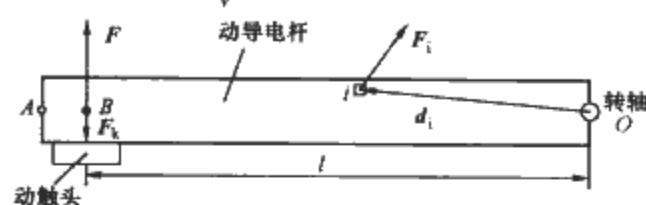


图 2.4-33 作用在动导电杆上的电动斥力计算示意图

采用三维有限元分析,可以得到作用在动导电杆上和触头上的电动斥力。由于该力和短路电流之间存在单调增的关系,不考虑铁磁物质的影响时,电动斥力与短路电流的平方成正比。而且在特定的短路条件下,短路电流和时间有一定的关系,若在触头斥开之前,取电路方程为式(2.4-49),其中 I 为电流第一半波的有效值,频率为工频 50Hz。这样就可以通过对上述过程的迭代处理,当电动斥力 F 等于触头预压力 F_k 时,迭代结束,此时对应的时间即为触头斥开的时间。图 2.4-34 为计算触头斥开时间的迭代流程图。为了考虑电流对触头压力和相应的导电桥半径的影响,电动斥力、触头压力和导电桥半径每隔 100A 计算一次。

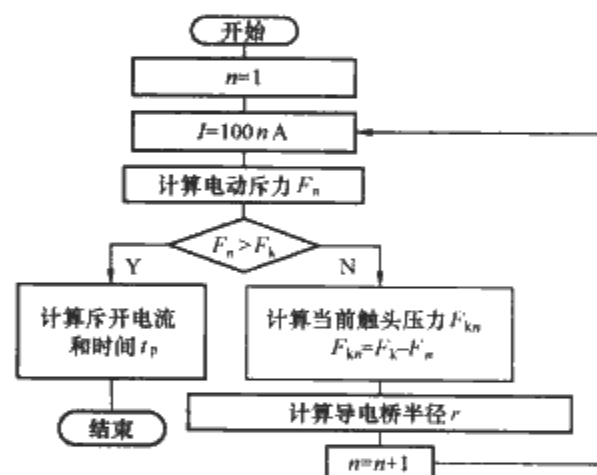


图 2.4-34 触头斥开时间计算流程图

$$i = \sqrt{2} I \sin \omega t \quad (2.4-49)$$

6.3.1 触头间电接触的导电桥模型

一般来说,看似平坦光滑的触头表面其实是凹凸不平的,而且覆盖有一层不导电的氧化层。不同的触头材料、不同的加工方法、不同工艺过程所得到的表面微观状态都不相同,它将在很大程度上影响两金属表面相互接触的物理过程和接触表面的物理图景。而在触头压力弹簧的作用下,触头表面将发生塑性变形,绝缘膜破裂后形成分布的微小导电斑点。

这样,当电流流过触头,电流线在接触面附近发生收缩,因而在触头间会产生电动斥力,也即 Holm 力 F_H 。一般来说,它与电流瞬时值 i ,触头间的预压力 F_k ,触头材料的布氏硬度 H ,触头形状及触头表面的导电斑点分布情况等有关。可以用式(2.4-50)所示的 Holm 公式来描述

$$F_H = \frac{\mu_0}{4\pi} \ln \left(\frac{R}{r} \right) i^2 \quad r = \sqrt{\frac{F_k}{\pi \xi H}} \quad (2.4-50)$$

式中: r 为导电斑点的半径; R 为触头的等效半径; ξ 用来表征触头的表面接触情况,其范围为0.3~0.6,一般取0.45。

对于 Holm 公式的一般工程应用来说,假定接触面中心只有一个导电斑点,或者认为全部的导电斑点集中在中心形成一个大的导电斑点。

在进行电动斥力的数值计算时,可以采用导电桥模型来模拟触头间的电流收缩,图 2.4-35 为导电桥模型的示意图。导电桥材料属性和触头相同,接触半径 r 可用式 (2.4-50) 得到,高度 h 可取 0.2mm。

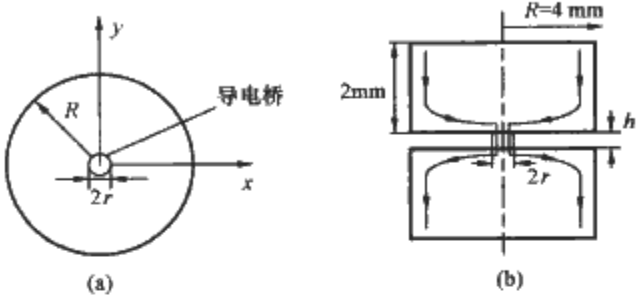


图 2.4-35 导电桥模型示意图
(a) 正视图; (b) 前视图

6.3.2 几种不同结构的 MCCB 电动斥力分析

本节应用上述方法,采用三维有限元非线性分析,首先针对五种 MCCB,对比分析了触头灭弧系统结构对触头闭合时电动斥力的影响;并计算了触头的斥开时间。

对两种额定电流均为 100A 的塑壳断路器产品 CB1、CB2 进行了仿真。其中 CB1 静导电杆采用水平面 U 形,而 CB2 采用下进线 U 形,如图 2.4-36 (a) 和图 2.4-36 (b) 所示。为了研究不同的触头灭弧系统对电动斥力的影响,在不改变产品其他形状及尺寸下,将 CB1 的静导电杆改为平板式,形成如图 2.4-36 (c) 所示的 CB3 模型;将 CB2 的栅片腿长缩短,并加入 U 形电动机槽,形成如图 2.4-36 (d) 所示的 CB4 模型;去掉 CB1 模型的灭弧栅片,形成 CB5 模型。图 2.4-36 (a) 和图 2.4-36 (c) 的右下角分别为 CB1 和 CB3 静触头区域的俯视图和电流方向的示意图。

同样地,由于各个模型均关于中心面对称,这样仅需要一半建模与计算。对应于图 2.4-36 (a) 右下角的电流方向,和图 2.4-37 (b) 不同,从图 2.4-37 (a) 所示的 CB1 俯视

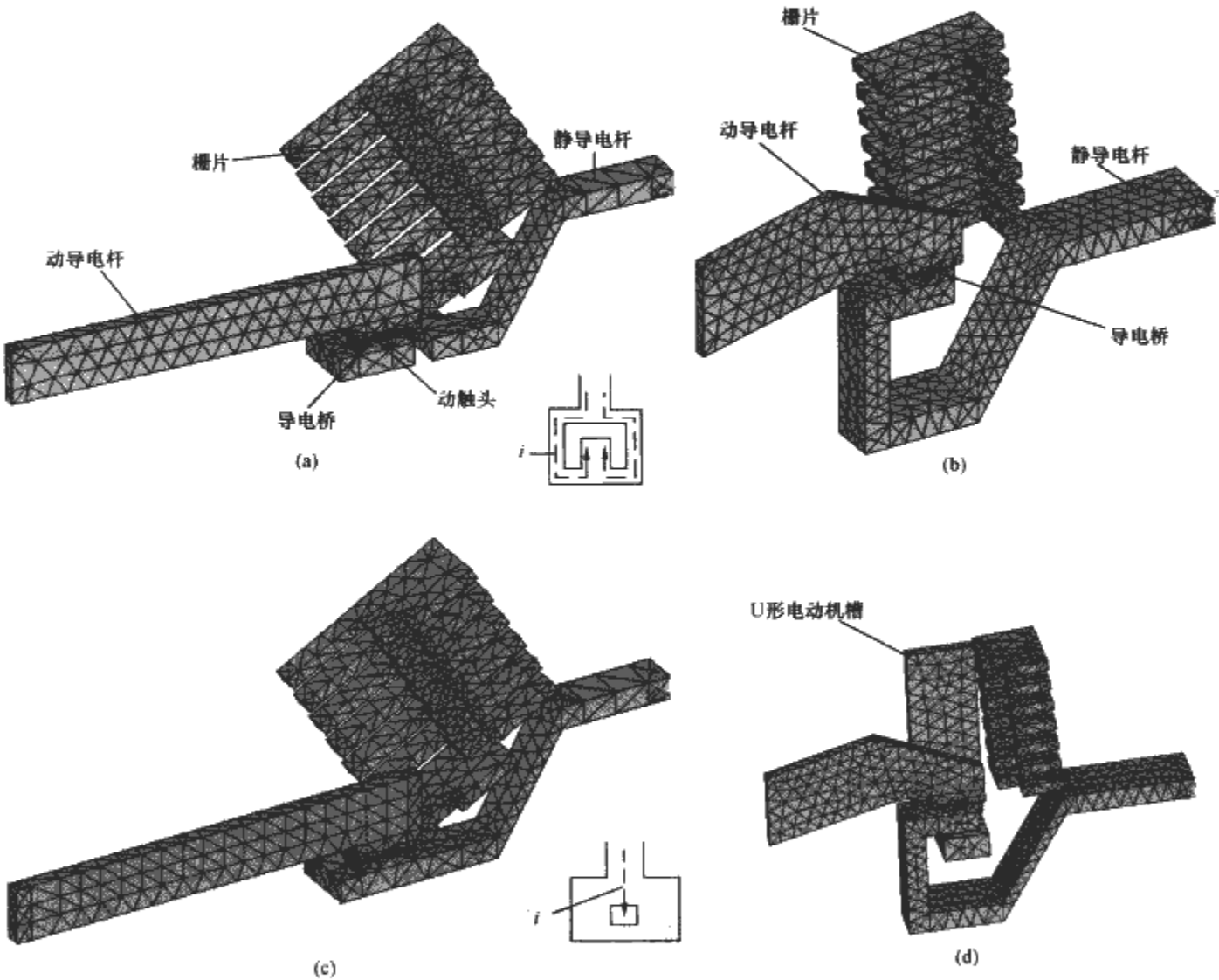


图 2.4-36 MCCB 模型的剖分图
(a) CB1; (b) CB2; (c) CB3; (d) CB4

图可以清晰地看到由于其静导电回路的 U 形弯曲导致图中 1 所示部分的电流方向和动导电杆相反。另外,本节所有分析都是相对于图 2.4-36 (a) 所示的坐标系进行的,其中 x 、 y 及 z 轴正方向符合右手法则,在该图中, y 轴正方向垂直纸面向外。从 2.4-37 (c) 可以看出,触头上由于电流收缩,其电流密度最大值比动导杆上高 5 个数量级。

图 2.4-38 为沿 CB1 和 CB3 动导电杆上 z 方向的平均磁感应强度 B_z 和 y 方向上的平均力密度 f_y 分布,其原点为动导电杆的左端,也就是图 2.4-33 中的 A 点。可以发现,靠近触头的区域,磁场和力密度均比较大,而且该区域远离转轴,力臂较大,因而可以认为,回路电动斥力,也就是

Lorentz 力 F_L 主要取决于这部分。同时明显看到 CB1 的磁场和力密度较 CB3 大。

在统一计算 Holm 力 F_H 和 Lorentz 力 F_L 的数值分析过程中,也可以认为作用在动导电杆上 B 点 (见图 2.4-33) 的等效合力由两部分组成,即认为作用在动导电杆上的力为 F_L , 作用在动触头上的力为 F_H 。这一点可以通过下面的仿真来验证。对 CB2, 10kA 电流时,不考虑触头间的电流收缩时,作用在动导电杆和动触头上的合力为 15.66N; 另一方面,考虑触头间的电流收缩时,作用在动导电杆上力为 12.34N, 而作用在动触头上的力为 30.98N。因此,为了便于接下来的分析,分别用 F_L 和 F_H 来近似描述作用在动导电

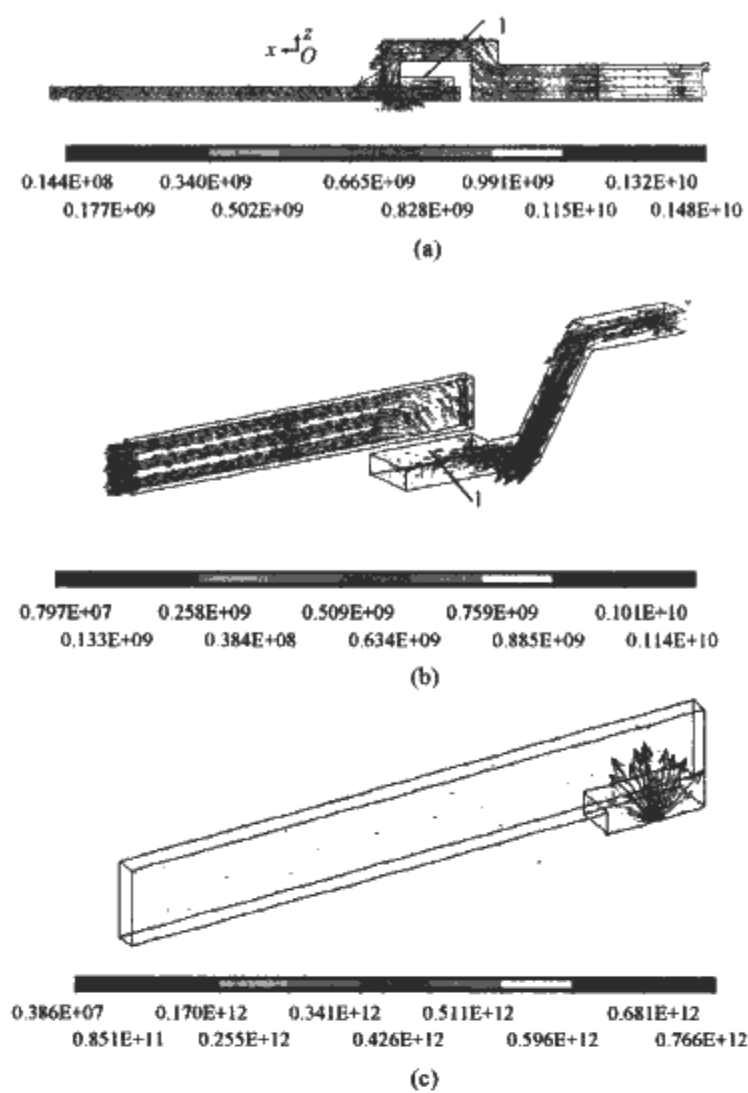


图 2.4-37 模型电流密度分布
(a) CB1 动、静导电杆电流密度分布；(b) CB3 动、静导电杆电流密度分布；(c) CB1 动导电杆和动触头电流密度分布

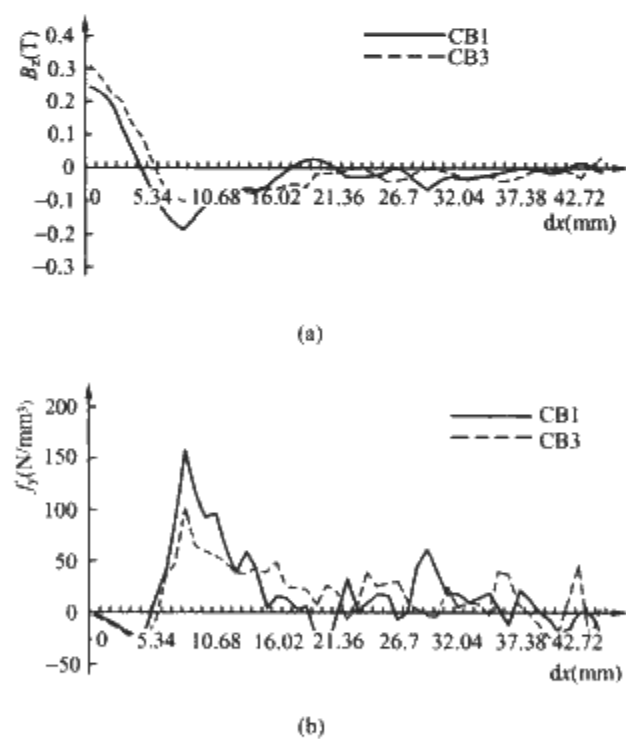


图 2.4-38 CB1 和 CB3 动导电杆上的磁感应强度和力密度分布
(a) 动导电杆上沿 z 向磁感应强度分布；
(b) 动导电杆上 y 方向上力密度分布

杆和动触头上的电动斥力。

从表 2.4-13 所示的对 CB1 的计算数据来看，电动斥力和电流的平方近似成正比例关系。表 2.4-14 所示为 10kA 电流时，五种模型的电动斥力计算结果。从表 2.4-13 和表 2.4-14 可以看出， F_H 占整个电动斥力的 70% 左右。比较 CB3 和 CB1 的计算结果，将静导电杆的形状从水平 U 形改

为平板形，电动斥力有所减小，说明水平 U 形通过改变电流的方向，有利于加强触头区域的磁场及相应的电动斥力，这一点也和图 2.4-38 的结果相一致。对 CB5 来说，由于没有栅片，和 CB1 相比， F_L 的数值减小了 40% 左右，说明铁磁物质可以有效地加强动导电杆上的磁场。对 CB4 来说，通过改变 CB2 的栅片尺寸并加入 U 形电动机槽后，电动斥力也有所增大。同时，这种改进也有利于将产气材料固定在电动机槽内侧，利用新的气吹灭弧原理提高 MCCB 的开断性能。

表 2.4-13 CB1 模型的电流和电动斥力之间的关系

电流 (kA)	F_L (N)	F_H (N)	合力 (N)
2.5	0.96	2.27	3.23
5	3.35	9.03	12.38
7.5	6.63	20.24	26.87
10	10.71	35.88	46.59

此外，在表 2.4-14 所示条件下，可以用 Holm 公式来计算作用在动触头上的电动斥力 F_H 。对 CB1 和 CB2 来说， F_H 分别为 40.33N 和 38.45N，同表 2.4-14 的结果相比，有一定的差别，这主要是由于导电回路产生的磁场对动触头上电动斥力的影响引起的。

表 2.4-14 五种模型在 10kA 电流时的电动斥力计算结果

模型	触头预压力 (N)	导电桥半径 (mm)	F_L (N)	F_H (N)	合力 (N)
CB1	2.5	0.044 3	10.71	35.88	46.59
CB3	2.5	0.044 3	8.54	34.49	43.03
CB5	2.5	0.044 3	6.00	35.48	41.48
CB2	4.4	0.058 8	12.34	30.98	43.32
CB4	4.4	0.058 8	15.04	31.10	46.14

此外，如果忽略触头压力和导电斑点半径之间的关系，并假定电动斥力和电流的平方成一比例关系，就可以初步设计出比较理想的触头预压力。一般来说，断路器瞬时脱扣器的动作电流为额定电流的 12 倍，由此因电动斥力而使动触头斥开的电流应大于瞬时脱扣器的整定电流，否则机构没有动作而触头斥开，会造成动触头斥开后跌落而与静触头熔焊。对 CB2 来说，通过计算当触头预压力为 4.4N 时开始斥开的电流为 2825A，因此预压力的设计值应大于下式计算值 $(12 \times 2^{0.5} \times 100^2 \times 4.4 / 2825^2) \text{N} = 1.59 \text{N}$ 。

在此基础上，考虑到脱扣器的安全裕量以及热动稳定性，就可以设计出一个比较优化的触头预压力数值。

6.4 万能式断路器 (ACB) 电动斥力计算及电动力补偿

通常情况下，万能式断路器的动触头系统由多片触头片并行组成，如图 2.4-39 所示。针对一额定电流为 2500kA 的万能式断路器，采用上述计算电动斥力的方法，研究短时耐受电流为 50kA 时的电动斥力。

该 ACB 的动触头系统由 10 个触头片组成，沿其对称面向外，可以分别标记为 1, 2, 3, 4, 5。表 2.4-15 给出了其计算结果。可以看出：位置靠内的动触头片所受电动斥力大于位置靠外的动触头片所受电动斥力。



图 2.4-39 动触头系统模型图

表 2.4-15 各触头片上的电动斥力

序 号	1	2	3	4	5
电动斥力 (N)	13.1	13.4	13.1	12.7	10.3

在保持通过每一片动触头片组的电流密度不变，可分析动触头的并联支路数对电动斥力有一定的影响。也即在通过触头系统的总电流不变的条件下，当动触头并联支路数增加时，动触头片组的横截面积减少，反之增加。并可通过式 (2.4-51) 来计算动触头片的横截面积

$$S_2 = S_1 (n_1 / n_2) \tag{2.4-51}$$

式中：S₁ 为原横截面积；S₂ 为片数改变后横截面积；n₁ 为原片数；n₂ 为改变后的片数。

表 2.4-16 为分析结果，可以发现：动触头片并联支路数对各个动触头片所受的电动斥力影响较大。随着动触头并联支路数的增加，各动触头片受力明显减少。当支路数在 2~8 之间变化时，总电动斥力变化较大，当支路数在 8~12 之间变化时，总电动斥力变化不大。

表 2.4-16 支路数对电动斥力的影响

支路数	2	4	6	8	10	12
总电动斥力 (N)	255.55	172.01	143.83	126.16	124.9	120.24

导电杆的转轴位置对断路器的电动力补偿有重要的影响。采用上述方法，可定量地计算转轴对电动斥力的影响。图 2.4-40 给出了转轴位置变化的示意图。设动导电杆的初始转轴位置为 A，现改变转轴的位置依次取 B、C，BAC 在一条直线上，且直线 BAC 平行动触头片的斜边 DE，BA 为 2mm，AC 为 2mm。

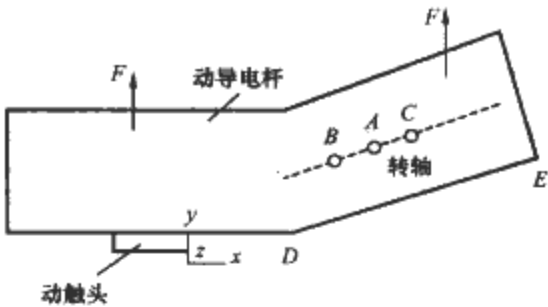


图 2.4-40 转轴位置示意图

从表 2.4-17 的计算结果可以看出，当转轴向触头方向移动时，各动触头片所受电动斥力明显减少，全部动触头片所受总的电动斥力也大幅减少；反之，各动触头片所受电动斥力和总电动斥力大幅增加。产生这种情况的原因分析如下：由 Holm 力 F_H 的公式可知，F_H 的大小与转轴位置无关，因此当转轴位置变化时，发生变化的是 F_L 力。动触头片上每一个单元都要受到 F_L，这些力将产生使动触头片绕转轴旋转的力矩。位于转轴左侧的单元所受的 F_L 产生使触头斥开的力矩，而位于转轴右侧的单元所受的 F_L 将产生使触头闭合的力矩。所以这部分力矩起补偿电动斥力的作用。当转轴位置沿直线 BAC 向触头方向移动时，补偿电动斥力的力矩变大，使每片动触头上电动斥力和总的电动斥力变小，有利于提高断路器的电动稳定性。反之，当转轴位置沿直线 BAC 向离开触头方向移动时，补偿电动斥力的作用减小，每片动触头所受电动斥力和总的电动斥力则增加。

表 2.4-17 转轴位置对电动斥力的影响

主轴位置	C	A	B
总电动斥力 (N)	159.06	125.18	82.44

此外，以上的分析可以有效地解释在断路器耐受试验中存在的现象，即断路器动触头斥开时边缘的动触头极易发生烧焊，而内部动触头却保持完好。这是由于各动触头片所受电动斥力大小不同，靠内的动触头片所受电动斥力大，靠外的所受电动斥力小。因此在动触头片斥开时，内部的动触头片先于外部的动触头片斥开。当内部的动触头片斥开后，外部动触头片通过电流急剧增大，所以外部动触头易发生烧焊。因此可以考虑在设计新的触头系统时，使内部动触头片的预压力大于外部动触头片上的预压力。

第5章 低压断路器

1 概述

1.1 用途

低压断路器是低压电器中最重要的保护及控制元件之一，主要用于工矿企业、高层建筑、宾馆、医院、机场、码头及现代居住小区中的低压配电网中，用作保护交直流电器设备，使之免受过电流、逆电流、短路和欠电压等不正常情况的危害。同时也可用于不频繁地起动电动机及操作或转换电路。智能型低压断路器和可通信低压断路器更适用于自动化变电站及现代电网的集中控制。

1.2 分类

低压断路器的分类非常复杂，有多种分类法：

- (1) 按电流种类分：①交流（AC）；②直流（DC）。
- (2) 按灭弧介质分：①空气；②真空；③气体。在低压断路器极少应用。
- (3) 按使用类别分：
 - 1) A类——在短路情况下，断路器无明确指明用作串联在负载侧的另一短路保护装置的选择性保护，即在短路情况下无选择性保护所需要的人为短延时。因而无短时耐受电流要求。
 - 2) B类——在短路情况下，断路器明确作串联在负载侧的另一短路保护装置的选择性保护，即在短路情况下，可实现选择性保护，有人为短延时（可调节）。因此，有短时耐受电流要求。
- (4) 按结构型式分：
 - 1) 万能式，简称ACB。所有的零件都安装在一个绝缘的或金属的框架上，有较多的结构变化，较多种的脱扣器，较多数量的辅助触头。一般选择型断路器、快速断路器、特别是大容量断路器多设计成万能式。
 - 2) 塑料外壳式（塑壳式），简称MCCB。所有的零部件都安装于一个绝缘外壳中。塑料外壳式断路器结构紧凑、体积小、质量轻、价格较低，并且使用较安全（指操作者接触

导电部件可能性小），适于独立安装。额定电流较小的断路器多设计成塑料外壳式。

- (5) 按保护装置分：
 - 1) 热式。多为双金属式。
 - 2) 电磁式。有带线圈的铁心，多用于瞬时动作的脱扣器或作后备保护。
 - 3) 电子式。利用电子器件构成脱扣器。
 - 4) 智能式。利用微处理器构成脱扣器，可达到各种保护特性。
 - 5) 可通信智能式。智能脱扣器增加界面和现场总线可支持各种通信规约，达到双向通信。
 - (6) 按动作原理分：
 - 1) 限流型。适用于交流，利用短路电流斥力效应使触头快速打开、分断。能在第一个波峰最大值尚未出现时把短路电流分断。
 - 2) 非限流型。一般工业用，包括选择性。
 - (7) 按分断速度分：
 - 1) 一般型。动作时间在20ms以上，一般工业用。
 - 2) 快速型。动作时间在10~20ms之间，多用于直流。
 - (8) 按用途分：
 - 1) 配电断路器。用于电力电路，保护电路和电器设备免受短路、过载危害的断路器，确保供电。
 - 2) 电动机保护用断路器。专门用于保护起动电动机的断路器。
 - 3) 特殊用途的断路器。例如灭磁断路器。
 - 4) 剩余电流保护断路器。IEC 60947-2 附录B。
 - 5) 无过电流保护断路器（CBI）。IEC 60947-2 附录L。
 - 6) 瞬时动作断路器（ICB）。IEC 60947-2 附录O。
- 无过电流保护断路器（简称CBI）和瞬时动作断路器（简称ICB）似乎区别不大。前者可以完全没有过电流（过载和短路）脱扣装置，适合作隔离器用。后者带有瞬时动作脱扣器，除作隔离器外，强调了与电动机保护装置和其他过电流保护装置配合。这种断路器的任务是作后备保护。

表 2.5-1 列出了断路器按用途分类表。

表 2.5-1 断路器按用途分类

名 称	电流种类和范围	保 护 特 性			主 要 用 途
配电用断路器	交流 200~6300A	选择型 (智能型)	二级保护	瞬时 短延时	电源总开关和母联开关及支路近电源端开关。真空断路器还用于特殊环境，如多尘、气体腐蚀、爆炸环境等
			三级保护	瞬时 短延时 (区域联锁) 长延时	
		非选择型	限流型	长延时	
			一般型	瞬时	
	直流 200~6300A	快速型	有极性 无极性		轨道交通和保护硅整流设备
		一般型	长延时 瞬时		保护一般直流设备

续表

名 称	电流种类和范围	保 护 特 性			主 要 用 途
电动机保护用断路器	交流 63~630A	直接起动	一般型	过电流脱扣器瞬动倍数 (8~15) I_N	保护笼型电动机
			限流型	过电流脱扣器瞬动倍数 $12I_N$	保护笼型电动机, 可安装在近电源端
		间接起动	一般型 限流型	过电流脱扣器 瞬动倍数 (3~8) I_N	保护绕线型电动机
剩余电流保护断路器	交流 63~3200A	动作电流 (A) 为 0.006, 0.01, 0.03, 0.1, 0.3, 0.5, 1, 3, 10, 30, 在 0.1s 内分断			保护电器设备安全、防止火灾及保证人身安全
无过电流保护断路器	交流 直流 200~6300A	无过电流保护, 但也可带一高倍瞬动脱扣器			主要作隔离用
瞬时保护断路器	交流 直流 200~6300A	无过电流保护, 带瞬动脱扣器			主要作电动机起动器的后备保护
特殊用途的断路器	交流或直流	一般只需瞬动			灭磁断路器及闭合开关等

2 断路器的动作原理

2.1 断路器结构组成

断路器一般由传感元件、执行元件和传递元件三部分组成。

2.1.1 传感元件

传感元件又称感受元件, 能感受到电路中不正常的情况和操作人员命令或其他继电保护系统的信号, 通过传递元件使执行元件动作。如过电流脱扣器、欠电压脱扣器和分励脱扣器等。

传感元件有许多类型, 其动作原理不同。

2.1.1.1 热双金属脱扣器

热双金属脱扣器主要感受过载电流的大小, 利用该电流通过热双金属片使双金属弯曲而动作。通过热双金片的电流越大, 它的弯曲变形越快越大, 脱扣器的动作时间越短。形成反时限的保护特性。

2.1.1.2 电磁式脱扣器

电磁式脱扣器由电流线圈、铁心、衔铁和反力弹簧构成。当过电流通过电流线圈时, 衔铁上所产生的电磁力足以克服反力弹簧而吸向铁心, 产生瞬时动作。改变反力的大小可以改变动作电流值。多用于大短路电流的保护。如果用阻尼装置 (油阻尼器或钟表延时机构) 配合, 亦可得到延时动作。

分励脱扣器也是一种电磁式脱扣器, 它由电压线圈、铁心、衔铁和反力弹簧机构构成。由控制电源供电, 它可以按照操作人员的命令或继电保护信号使分励脱扣器动作, 从而使断路器断开。一台断路器可装一个或两个分励脱扣器, 以满足控制的需要。

失压脱扣器或欠电压脱扣器也是一种电磁式脱扣器, 感受电源电压的变化。当电压正常时 (额定电压), 衔铁处于吸合状态。当电源电压消失或降低至一定数值 (一般为额定电压的 35%) 时, 失压或欠电压脱扣器的电磁吸力不足以继续吸持衔铁, 在反力弹簧的作用下, 衔铁被释放而使断路器分断电路。

2.1.1.3 电子式脱扣器

电子式脱扣器由传感器、电子电路和脱扣执行机构构成。电子式脱扣器可以方便地获得长延时、短延时、瞬时保

护特性和接地保护等, 具有明显的优势, 同时发展迅速。

电子式脱扣器的传感器为电流互感器, 装在断路器的主电路中, 经适当的变比反应主电流的变化。互感器有两种型式: 其一为带铁心速饱和互感器, 它的二次输出可作为电子电路的工作能源, 其低电流区曲线性较好, 可用作采集电流变化信号; 其二是无铁心的空心互感器, 主要用作信号采集, 因为它的线性较好。为了提高脱扣器的可靠性和精确度可同时采用两种互感器来组成采样电路, 例如现代智能型断路器就采用这种方式。

电子式脱扣器的脱扣执行机构可用分励脱扣器、欠电压脱扣器或磁通变换器来完成。

采用分励脱扣器者是电子电路的最终触发信号送至分励脱扣器, 使分励脱扣器吸合从而使断路器分断。同样采用欠电压脱扣器者是电子电路的最终触发信号送至欠电压脱扣器, 将欠电压脱扣器短接, 使欠电压脱扣器动作而使断路器分断。这两种方式的优点是结构简单, 通用性强。其缺点是电子电路要提供较大的功率, 且动作速度较慢, 在老产品中较多采用。在新型智能脱扣器中则采用磁通变换器作脱扣执行机构, 其消耗功率小, 动作速度快, 体积质量也小, 工作可靠。

所谓磁通变换器, 是一种类似极化继电器工作原理的电磁系统。当断路器处于正常闭合位置时, 磁通变换器的铁心被永久磁钢的吸力吸位。当出现过电流时, 通过传感器至微处理器处理过的信号使线圈有电流流过, 提供一个反向磁通, 抵消了永久磁钢的吸力, 铁心在反作用弹簧下弹出, 推动机构的脱扣指使断路器脱扣。由于造成反向磁通的电流极小, 因而脱扣所需的功率很小。

图 2.5-1 所示为采用分立电子电路的交流电子脱扣器框

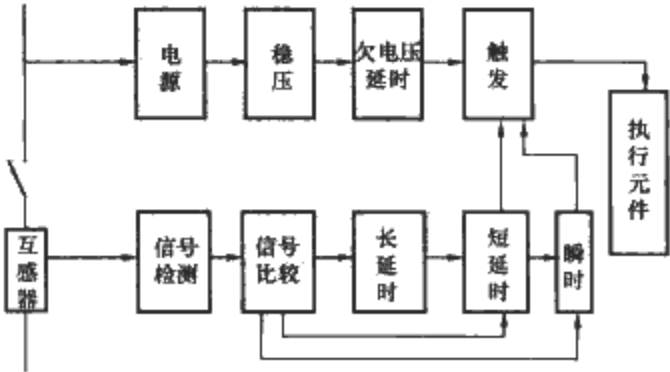


图 2.5-1 采用分立电子电路的交流电子脱扣器框图

图。从图中可看出,它由互感器、信号检测、信号比较、延时电路、触发电路、脱扣执行元件及电源等组成。

图 2.5-2 所示为智能型电子脱扣器的框图。从图可以看出智能型电子脱扣器由互感器、中央控制单元 CPU、功率放大、显示器、键盘等组成。其最大特点是采用微处理作中央控制单元 CPU,以达到智能化的目的。

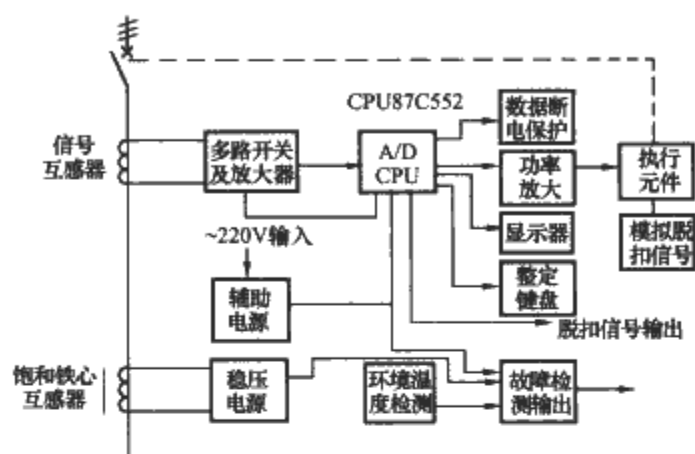


图 2.5-2 智能型电子脱扣器的框图

2.1.2 执行元件

执行元件包括主触头和灭弧室,二次触头(辅助触头)也是一种执行元件。触头执行接通或分断电路的任务,灭弧室用来配合触头执行任务、帮助熄灭触头分断时产生的电弧。

触头系统有多种类型。例如有单断点触头、双断点触头(桥式触头),主触头、弧触头。有时还有副触头(三挡触头),单片触头和并联触头(多个单片触头并联),以及对接触头和插入式触头,要根据具体情况选用。灭弧室有栅片式和窄缝式等,现在交流断路器多用栅片式灭弧室,直流断路器多用窄缝式灭弧室。

2.1.3 传递元件

传递元件是承担力的传递、变换的部件,它包括传动机构、自由脱扣机构、主轴、脱扣轴等。断路器的绝缘底座、外壳或框架属承担力的传递的部件,各种机械连杆承担力的传递与变换。传动机构将人力或电力变为合闸力,使断路器闭合或断开。主轴把三相或四相触头带动一道闭合或断开。脱扣轴则把各相的脱扣动作传递给机构使之脱扣。

自由脱扣机构是低压断路器的一种特有性能,它把传动机构和触头系统之间的联系变为柔性联系。当自由脱扣机构再扣时,传动机构,特别是手动传动机构能直接带动触头系统闭合。当自由脱扣机构脱扣时,则解脱了传动机构与触头系统之间的联系。这时传动机构不能带动触头系统闭合。它应满足:当闭合操作开始之后,若进行断开操作时,即使闭合命令继续保持着,其动触头能回到并停留于断开位置。以达到操作安全的目的。

2.2 一般断路器的动作原理

将上述传感元件、执行元件和传动元件合理地组合一起,可构成一台断路器。图 2.5-3 为热磁式断路器的结构原理图,图 2.5-4 为智能型断路器的结构原理图。图中主触头、辅助触头被传动杆连动,当反时针方向推动操作手柄时(手动传动机构),闭合力经自由脱扣机构传递给传动杆,使触头闭合。最后锁扣将自由脱扣机构锁住,被保护电路接通。为了实现过载和短路保护,三相(或四相)主电路内串

有热磁式脱扣器(图 2.5-3)或穿有电流互感器(电子式或智能型,图 2.5-4)。当三相中任何一相或二相、三相出现过电流时,感受元件将动作。过电流不大时,热双金片慢慢弯曲(与电流大小成反比),经过一定延时后推动脱扣轴,使机构脱扣(热磁式)。当过电流大到足以克服铁心上的反力弹簧时,铁心迅速向上运动,推动脱扣轴,使机构瞬时脱扣;或当出现过电流时,互感器的二次输入超过整定值时(智能型),过电流信号经运算处理后使机构脱扣。可达到过载长延时、短路短延时,大短路电流瞬时动作的保护特性。

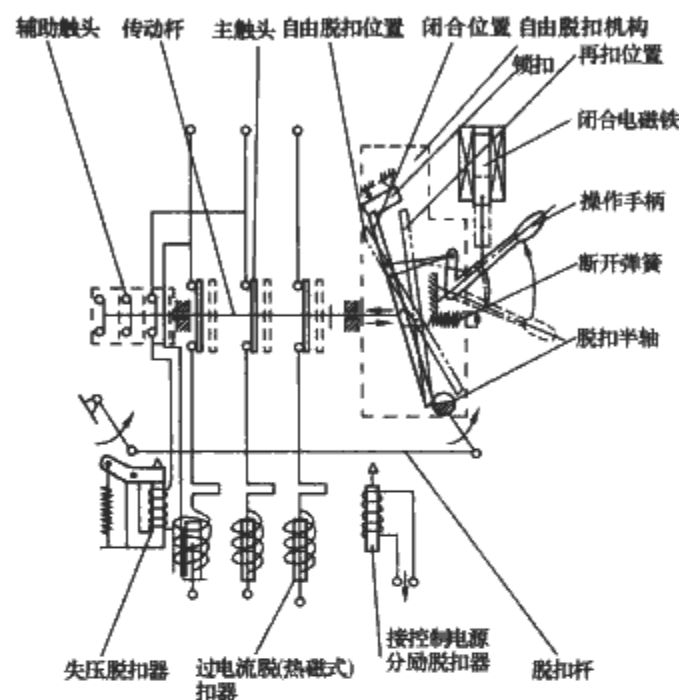


图 2.5-3 热磁式断路器的结构

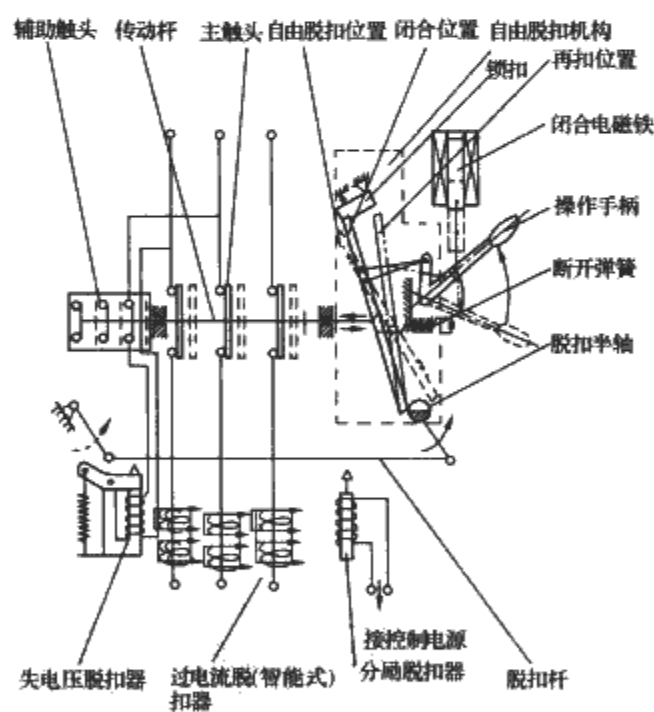


图 2.5-4 智能型断路器结构原理图

传动机构除手动外可带电动传动机构,电磁铁和电动机操作都有应用。采用电动机传动者一般都是储能操动机构。即电动机转动通过齿轮系统减速后将储能弹簧压缩或拉伸,直到能量储足,然后将此能量释放,推动机构快速闭合。

装有欠电压脱扣器的断路器可完成欠电压保护。装有分励脱扣器的断路器可实现遥控,可远方发指令,令断路器分断。以上各部件装入一个塑料外壳中就成为一台塑料外壳式断路器。所有零部件装入绝缘材料或金属材料的框架中,就成为万能式断路器。

交流限流式断路器和直流快速断路器由于有快速和限流的要求则各有其特点。

2.3 直流快速断路器的动作原理

断路器断开交直流电路时的波形和时间如图 2.5-5 所示。当直流电路发生短路时，其短路电流 i 按图 2.5-5 (a) 中的曲线 1 上升，最终达稳定短路电流 I_{km} 。当电路内装有快速断路器时，短路电流增长到其整定电流 I_A 时，脱扣器开始动作，脱扣器的动作使快速传动机构释放，触头开始分开，也就是经过固有动作时间 t_0 后触头间出现电弧。如回路电压较高时（约 300V 以上），触头之间将产生熔融的金属桥，只有当金属桥断裂后才出现电弧，这样固有动作时间就增长，它为断路器机构动作时间和金属桥断裂时间之和。当触头间出现电弧时，其回路方程式为

$$E = Ir + L \frac{di}{dt} + U$$

触头间出现电弧后，短路电流仍将继续增长，到 $L \frac{di}{dt} = (E - Ir) - U_a = 0$ 时，电流达最大值，即为实际最大分断电流 I_k 。在达到最大实际分断电流之后， $L \frac{di}{dt} = (E - IR) - U_a < 0$ 时，短路电流将按曲线 2 开始下降。由于灭弧室的作用，电流一直下降到零，电路最终全部分断。

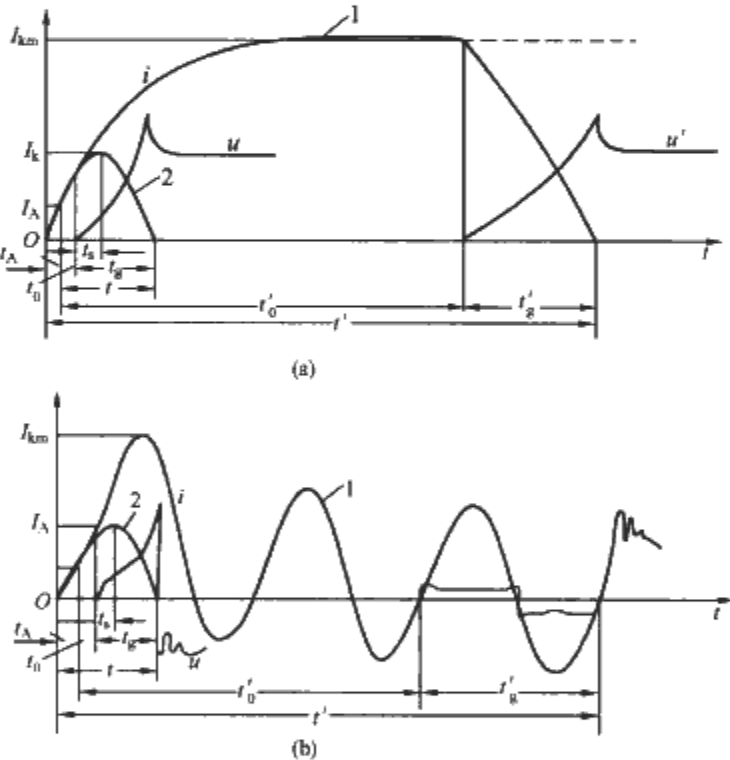


图 2.5-5 断路器断开交直流电路时的波形和时间图
(a) 分断直流电路；(b) 分断交流电路

实际最大分断电流 I_k 与最大稳定短路电流 I_{km} 之比称为限流系数 K_i ，即

$$K_i = \frac{I_k}{I_{km}}$$

限流系数是评价快速断路器重要性能指标之一，一般要求在 0.6 以下。由于电动力正比于电流平方，因此采用快速斥开可将回路的电器设备在短路时所承受的电动力降低到原来的 36% 以下，这样，既可节省回路和电器设备的投资，又可保证回路设备可靠运行。此外，分断短路电流所产生的热量 ($\propto \int i^2 dt$) 也降低了，这对硅变流装置的短路保护来说尤为重要。

根据上述分析，要提高断路器的限流能力，缩短全部断

开时间，必须从下列几方面着手：

(1) 减少时间 t_A 。如回路参数（电阻和电感）和开关的整定电流均为一定时，则 t_A 也一定。但是故障时的 $\frac{di}{dt}$ 要比正常接通时的 $\frac{di}{dt}$ 大得多，因此在快速开关中，穿过开关脱扣器那一部分的母线上采用并联电感的方法来改变短路时电流的增长率，以缩短 t_A 的数值。不论电磁式还是电子式脱扣器均可采用这种方法。图 2.5-6 为这种方法的示意图。由图可知

$$i_1 R_1 + L_1 = i_2 R_2 + L_2$$

式中： R_1 为并联电感的分路电阻； R_2 为穿过脱扣器部分的母线电阻； L_1 为并联电感； L_2 为穿过脱扣器部分的母线电感。

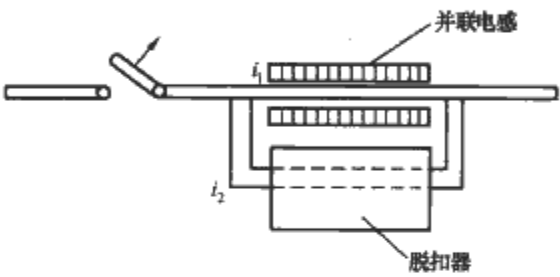


图 2.5-6 并联电路总示意图

正常接通时， $\frac{di}{dt}$ 极小， $L \frac{di}{dt}$ 可忽略不计，则

$$i_1 R_1 = i_2 R_2 \quad \frac{i_1}{i_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

电流是按电阻分配的，一般 i_2 为 i 的几分之一到几分之一。

短路时 $\frac{di}{dt}$ 很大， $L \frac{di}{dt} \gg Ir$ ，则由于 $L_1 \gg L_2$ ，因此 i_2 的增长率大于 i_1 的增长率，缩短了到达脱扣器整定电流的时间。提早动作的程度决定于并联电感的大小。

(2) 减少时间 t_0 。

1) 降低脱扣器作时间。机械保持式和电磁保持式快速开关的脱扣器都以电磁铁作为感受过载、短路和逆流信号而执行脱扣动作的，因此电磁铁的磁滞时间应尽可能少，或采用特殊磁系统来减少磁滞时间。对机械保持式断路器还包括脱扣电磁铁撞击锁扣和锁扣解脱的时间，因此其结构应灵巧，以尽量减少动作时间。采用电子脱扣方式，其动作时间极短，是一种比较好的脱扣方式。

2) 减轻可动部分的质量和选择合理的断开特性。可动部分是指动触头以及和它相连的连杆系统，在保证机械强度条件下质量越小越好。这样可在同样的作用力下，获得较大的断开加速度。断开特性是指运动的行程和时间的关系，以类似抛物线的断开特性最佳，可提高初始运动速度。采用电容储能感应电动斥力式机构、爆炸式的传动机构以及采用吸引电磁铁撞击式机构都具有这样的断开特性。

3) 缩短金属桥断裂时间。增强触头间磁场强度使金属桥在强大电磁力作用下迅速运动、拉长而断裂。

(3) 缩短燃弧时间 t_g 。断路器应配有强有力的灭弧室，为增强灭弧效果，还采用磁吹或气吹装置。磁吹既可缩短金属桥断裂时间，也可缩短燃弧时间。磁吹有主磁吹和辅助磁吹两种，但在小电流时效果较差。气吹则对小电流效果较好。表 2.5-2 列出磁吹和气吹的作用原理和适用范围。

表 2.5-2 磁吹和气吹的作用原理和适用范围

分类	结 构 图	作用原理和结构说明	适 用 范 围
主磁吹		串联于被分断的主回路中。吹弧线圈可以置于灭弧室外，一般带有导磁的铁心和铁轭	能适用于多种型式灭弧室
辅助磁吹		吹弧线圈置于灭弧室内，当电弧进入灭弧室后，吹弧线圈被串联在电弧之中，产生辅助磁场，加速电弧的熄灭	一般用于窄缝灭弧室
气吹		在开关断开过程中，机构带动小型气泵，将气吹向弧触头，加速电弧进入灭弧室	适用于小电流灭弧效果较差的灭弧室中

2.4 限流式断路器的动作原理

交流电路故障时要达到限流分断的目的，可以采用限流熔断器或自复式熔断器和断路器的组合，也可采用电动斥力式限流。

电动斥力式限流的限流原理和直流快速开关的原理基本相同。从图 2.5-5 (b) 中可以看出，在第一波峰内分断交流电路的情况和快速断路器分断直流电路的情况极为相似，差别在于交流短路电流上升的陡度比直流大得多，如果两者的整定电流 I_A 相同，交流到达 I_A 的时间 t_A 比直流的小，对限流作用是有利的。但是由于交流短路电流上升陡度极大，要起限流作用则要求固有动作时间 t_0 缩短到最小限度，一般应不大于 3ms，全部断开时间 10~20ms。限流系数 $K_i = I_k / I_{km}$ ，其中 I_{km} 为短路电流第一波峰的幅值，又称预期短路电流峰值； I_k 为实际分断电流最大值，又称允通电流。

限流断路器在分断不同短路电流时的限流系数是不同的。一般用分断极限短路电流时的限流系数来评价限流断路器的限流能力。限流断路器的限流系数也应在 0.6 以下。图 2.5-7 为限流断路器的限流特性和限流系数。

短路电流第一波峰幅值 I_{km} 和功率因数有关，当用变压器供电时，其 I_{km} 对短路稳定电流的幅值 $I_{k\infty}$ 之比（称为幅值系数 β ）和功率因数的关系示于图 2.5-8 中。在短路计算和试验中，常用短路稳定电流有效值 I_{kA} 来表示，如已知 I_{kA} 和功率因数，则可利用图 2.5-8 的曲线求得第一波峰幅值 $I_{km} = \sqrt{2}\beta I_{kA}$ ，图 2.5-7 中的预期短路电流特性是在 $\cos\varphi \approx 0.25$ 时算出的。

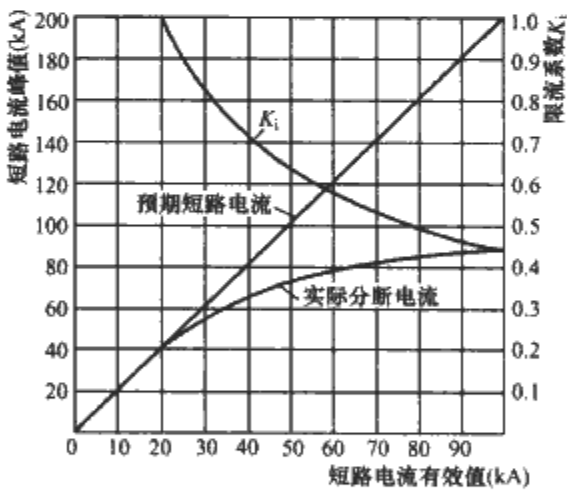


图 2.5-7 限流断路器的限流特性和限流系数

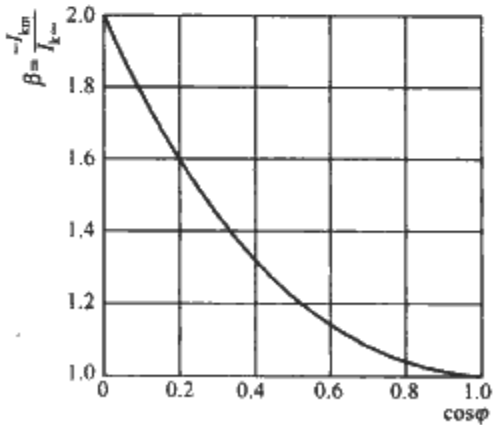


图 2.5-8 变压器短路时，幅值系数与功率因数的关系

限流断路器快速动作是利用短路电流所产生的电动力作为推动触头快速动作的力。电动力有两种，一种是触头之间所产生的电动斥力 F_c ，一种是平行导体间所产生的斥力 F_d 。如触头压力为 F_k ，则当 $F_d + F_c \geq F_k$ 时，触头即被电动力所斥开。触头斥开后，电弧即出现，利用电弧电阻的迅速增加，限制短路电流上升。这时，如果限流断路器触头继续斥开，直至最终断开位置，就实现了限流分断电路的目的。但是如触头斥开后不能继续运动到断开位置，当短路电流减少过零， $F_d + F_c$ 小于 F_k 触头将再次闭合，这样就会发生熔焊。为此限流式断路器必须设计一套触头斥开装置，或尽量缩短自由脱扣机构的动作时间，以保证触头一旦斥开就不会再次闭合而继续运动到断开位置。

电动斥力方式限流式断路器在分断短路电流时，触头在自由脱扣机构动作以前被电动力斥开，这样就省去了自由脱扣机构脱扣的时间，使限流断路器全部断开时间大为减少。

和直流快速断路器一样，为了缩短灭弧时间，提高限流作用，限流断路器亦需有强力的灭弧室。

2.5 真空断路器

顾名思义，真空断路器就是采用真空灭弧室，触头被密封在真空容器中运行以及接通分断电路。20 世纪初，人们发现真空间隙具有很高的介质强度。在真空中只要几毫米的间隙就能耐受几万伏的电压。因而国外首先制造出高压的真空开关。但当时由于密封、材料放气、慢性漏气问题没有解决，以致难以推广，直到 20 世纪中，随着电力电子学和材料冶金学的发展，触头材料取得了初步解决，真空工艺技术有了显著的发展，才制出了能适用的高压断路器。发展低压真空断路器至 20 世纪末才开始。

真空断路器的优势是高电压，低分断电流。而低压真空断路器正好是背道而驰，特点是电压低、分断电流大，其短路分断能力要求 20~100kA，这就对低压真空断路器的发展提出了难题。特别是要设计大额定电流 4000~6300A，高短路分断能力尚有难度。要解决这一难题，必须解决真空灭弧室的散热问题、发热问题和分断大短路电流问题，为此，要研制适用的新型结构和触头材料。对触头材料的要求大致如下：①大的分断电流能力，要求材料耐磨，低飞溅，低蒸发；②可靠的抗熔焊性能；③高的电导率和热导率，这一要求往往受抗熔焊性制约；④低的电弧烧损率，耐磨性好；⑤低的截流值，分断短路电流后过电压要小。

真空断路器的触头开距只要 3~4mm。超程 2mm。灭弧室（俗称真空泡）内部压 1.33×10^{-3} Pa，灭弧室外壳采用陶瓷，现在已能做到 20 年内保证内部真空度。

灭弧室中的触头为平板式接触，见图 2.5-9，内部这种接触必能产生电动斥力。需施加外力才能保证它能分断短路电流。这种外力由触头弹簧和电动补偿提供。其电动力补偿回路示意图如图 2.5-10 所示。

真空断路器除真空泡外，其余部分结构原理均和万能式断路器雷同，可以做到同样的保护特性，满足选择性保护要求。

真空断路器的主要特点是无爆炸危险，无污染，噪声低，适用于环境恶劣的场合。

由于真空断路器的触头密封在陶瓷真空泡中，看不见触头是否接通或隔离，宜采用抽屉式结构，对隔离有怀疑时，可将断路器拉出，以保证安全隔离，便于维护检修下级电器设备。

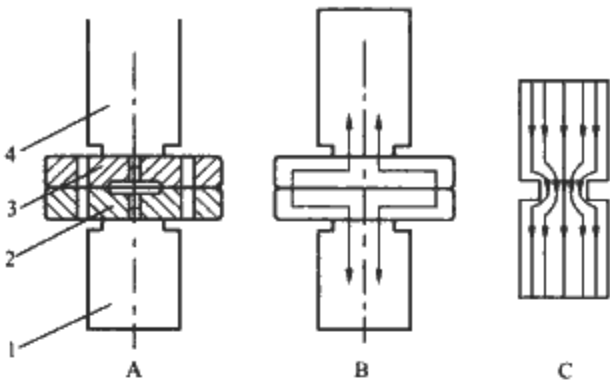


图 2.5-9 真空断路器

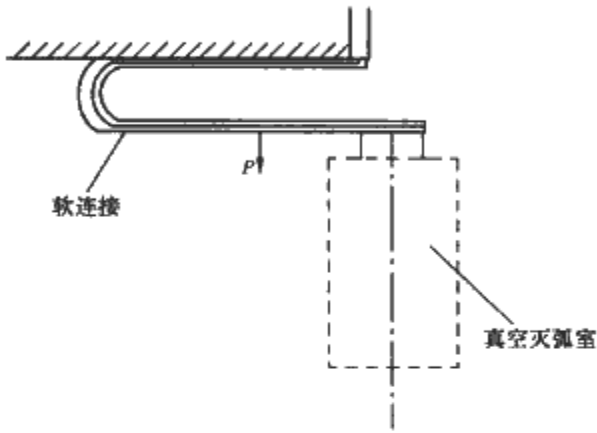


图 2.5-10 电动力补偿回路
示意图为图

真空断路器仍需符合 GB 14048.2 国家标准。

3 主要产品技术性能和参数

3.1 断路器的主要性能

3.1.1 额定极限短路分断能力 I_{cu}

按规定的试验程序所规定的条件，断路器能分断短路电流的能力，试验后不要求断路器连续承载其额定电流。用预期分断电流表示。试验顺序 O-t-CO；O 表示一次断开操作，CO 表示闭合操作后经一适当时间间隔紧接着一次分断操作，t 表示两个相继的短路操作之间的时间间隔，该时间间隔应为 3min 或断路器的复位时间，下同。

3.1.2 额定运行分断能力 I_{cs}

按规定的试验程序所规定的条件，断路器能分断短路电流的能力，试验后要求断路器连续承载其额定电流。用预期分断电流表示。 I_{cs} 可用 I_{cu} 的百分数表示，例如为 25% I_{cu} ，试后要求至少分断额定电流 25~50 次，按额定电流大小而定。试验顺序 O-t-CO-t-CO。

3.1.3 额定短时耐受电流 I_{cw}

额定短时耐受电流即按规定的试验程序所规定的条件，断路器能承受的短时电流值。短时时间应不小于 0.05s，其优选值如下：

0.05~0.1~0.25~0.5~1s。

断路器的额定短时耐受电流应不小于表 2.5-3 的规定。

选择型 (B 类) 断路器要求尽量高的 I_{cw} ，以满足选择性保护的要求。

表 2.5-3 额定短时耐受电流最小值

额定电流 I_N (A)	I_{cw} 的最小值 (kA)
$I_N \leq 2500$ $I_N > 2500$	$12I_N$ 或 5kA，取较大者 30

3.1.4 限流能力

对限流式断路器和快速断路器要求有较高的限流能力，限流系数在 0.6 以下。要求断路器有极快的动作速度，限流断路器的固有动作时间内应小于 3ms。

3.1.5 保护特性

保护特性就是断路器的动作时间与电流的函数曲线，横坐标表示电流（整定电流的倍数），纵坐标表示时间。两个坐标轴均采用对数坐标。对配电用选择型断路器要求有二段或三段保护特性，上一级的可返回时间要大于下级的断开时间，否则将破坏系统的选择性。电动机保护用断路器则要求长延时反时限特性能尽量和被保护对象的过载特性相配合。

3.1.6 操作性能能力

操作性能能力过去惯称机电寿命。操作性能能力有不通电和通电操作循环次数规定，其次按断路器额定电流大小有明确规定。额定电流大的断路器操作循环次数较少，额定电流小的断路器较多。

3.1.7 I^2t 特性

I^2t 表示与分断时间有关的 I^2t 最大值与预期电流（交流对称有效值）的函数关系（一般为一条曲线），预期电流可至最大值，是相应于额定短路分断能力及有关电压的预期电流。特别是对限流断路器有较重要的意义，在选择性配合中可作为配合协调的依据。

3.1.8 可通信能力

随着智能型断路器的出现，则引发出可通信问题。在现代自动化配电网中，下级断路器的各种信息要及时传送给中央控制计算机。中央控制计算机亦需及时传送至 F 级断路器，实现双向数传输。这就要求断路器有可通信能力，并能支持各种总线系统，例为 Modbus、Profibus、DeviceNet 总线系统。

3.2 典型断路器的技术参数

3.2.1 万能式断路器

低压断路器产品品种繁多，不胜枚举，现将万能式断路器、塑料外壳断路器，直流快速断路器和真空断路器等四大类典型产品分述于后。

3.2.1.1 DW45 系列万能式断路器

DW45 系列万能式断路器是我国“八五”重点开发项目之一，全国已有数十个工厂企业生产。它们都使用企业型号，例如，上海电器股份有限公司人民电器厂称 RMW1、常熟开关制造有限公司称 CW1、上海华通开关厂称 SH-WT1、杭州之江开关厂称 HSW1、宁波伊尔特智能电器开关有限公司称 NZW1、正泰集团公司称 NA1，德力西集团公司称 CDW1、苏州智能开关公司称 YSA2、长征电器集团公司称 MA40 等。该系列有三个壳架等级：框 I 为 630~2000A，框 II 为 2000~3200A，框 III 为 4000~6300A。图 2.5-11 为该系列断路器外形，断路器由本体和抽屉两部分组成。断路器本体插入抽屉座中成为抽屉式断路器。

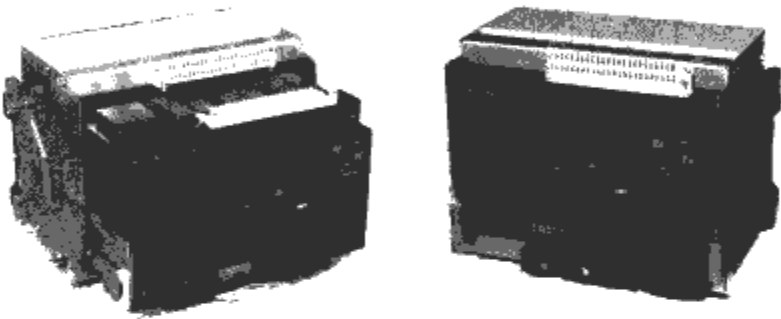


图 2.5-11 DW45 系列断路器外形

DW45 系列断路器主要技术数据与性能见表 2.5-4。

表 2.5-4 DW45 系列断路器技术数据与性能

断路器型号		框 I												框 II								框 III			
		DW45-630	DW45-800	DW45-1000	DW45-1250	DW45-1600	DW45-2000	DW45-2000	DW45-2500	DW45-2900	DW45-3200	DW45-4000/3	DW45-4000/4	DW45-5000	DW45-6300										
额定电流 I_N (A)		630	800	1000	1250	1600	2000	2000	2500	2900	3200	4000	4000	5000	6300										
额定工作电压 U_N (V)		690	690	690	690	690	690	1000	690	690	690	690	690	690	690										
额定绝缘电压 U_i (V)		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000										
极数(P)		3, 4	3, 4	3, 4	3, 4	3, 4	3, 4	3, 4	3, 4	3, 4	3, 4	3, 4	3, 4	3, 4	3, 4										
分断时间(ms)		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30										
合闸时间(ms)		60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60										
分断能力 (S—低, H—高)		S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H	S	H										
额定极限短路分断能力 I_{cu} (kA)	400V	65	80	65	80	65	80	65	80	65	80	65	80	80	100	80	100	80	100	80	100	100	120	120	120
	690V	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	65	65	65	65	65	65	65	65	65	85	85	85
额定运行短路分断能力 I_{cs} (kA)	400V	50	65	50	65	50	65	50	65	50	65	50	65	65	80	65	80	65	80	65	80	80	100	100	100
	690V	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	75	75	75
额定短时耐受电流 I_{cw} (kA)(1s)	400V	40	50	40	50	40	50	40	50	40	50	40	50	65	80	65	80	65	80	65	80	80	100	100	100
	690V	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	50	50	50	50	50	50	50	50	50	75	75	75

续表															
断路器型号		框 I						框 II					框 III		
		DW45-630	DW45-800	DW45-1000	DW45-1250	DW45-1600	DW45-2000	DW45-2000	DW45-2500	DW45-2900	DW45-3200	DW45-4000/3	DW45-4000/4	DW45-5000	DW45-6300
智能型脱扣器		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
(基本型)基本保护		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
(多功能型)可选择保护		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
(全功能型)通信接口		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
寿命次数	有维护	20 000	20 000	20 000	20 000	20 000	20 000	20 000	20 000	20 000	20 000	10 000	10 000	10 000	10 000
	无维护	13 500	13 500	13 500	13 500	13 500	13 500	10 000	10 000	10 000	10 000	5000	5000	5000	5000
	AC 400V	6500	6500	6500	6500	6500	6500	3000	3000	3000	3000	1500	1500	1500	1500
	AC 690V	3000	3000	3000	3000	3000	3000	2000	2000	2000	2000	1500	1500	1500	1500
安装形式	固定式	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
	抽屉式	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
外形尺寸 H×W×D (mm×mm×mm)	固定 3P	402×362×322	402×362×322	402×362×322	402×362×322	402×362×322	402×362×322	402×422×322	402×422×322	402×422×322	402×422×322	395×544×378	395×804×389	395×804×389	395×919×387
	固定 4P	402×457×322	402×457×322	402×457×322	402×457×322	402×457×322	402×457×322	402×537×322	402×537×322	402×537×322	402×537×322	—	—	—	—
	抽屉 3P	447×375×420	447×375×420	447×375×420	447×375×420	447×375×420	447×375×420	447×435×420	447×435×420	447×435×420	447×435×420	450×550×492	—	450×930×492	450×930×492
	抽屉 4P	447×470×420	447×470×420	447×470×420	447×470×420	447×470×420	447×470×420	447×550×420	447×550×420	447×550×420	447×550×420	—	450×930×492	450×930×492	450×930×492
质 量 (kg)	固定 3P	41	41	41	42.4	42.4	44.5	48	48	59	59	—	—	—	—
	固定 4P	53	53	53	55.1	55.1	57.8	61.6	61.6	76.7	76.7	—	—	—	—
	抽屉 3P	65.4	65.4	65.4	68	68	69.8	75	75	90	90	93	210	210	210
	抽屉 4P	83.9	83.9	83.9	87.8	87.8	92.3	95	95	117	117	125	210	210	210

DW45 系列断路器结构紧凑，成“田”字、“川”字形立体布置，见图 2.5-12。侧视图成“田”字形布置，右上方布置灭弧室和触头系统；右下方布置有电流互感器；左上方设置各种附件，诸如欠电压脱扣器、分励脱扣器、闭合电磁铁、辅助触头和二次插件等；左下方为操动机构。上下左右间有绝缘隔离，连接需要的活动部位的间隙控制在最小值，使触头系统在分断短路电流时所产生的气体不致喷射到脱扣操动机构系统，也不会喷至互感器，达到双重绝缘效果。正面为两层“川”字形布置，上层左为智能控制器，中间为操动机构（自由脱扣机构），右为电动机操作和手柄。下层为 A、B、C 三相主电路，相间绝缘可靠，使其不可能产生相间短路。

该系列断路器具有 L、M、H 三种智能控制器，可实现各种保护、显示、计量等功能。H 型控制器是有通信功能，与适配器组合，可支持 Profibus、DeviceNet 等总线。

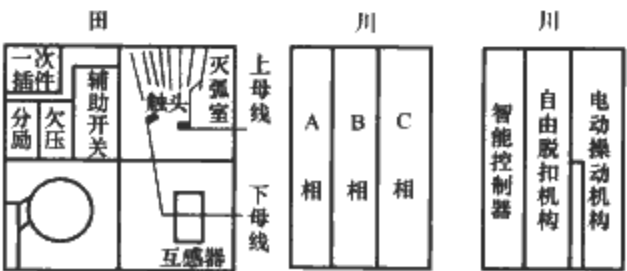


图 2.5-12 “田”、“川”字形布置图

3.2.1.2 DW450 万能式断路器

(1) 该产品为 DW45 系列万能式断路器的下延伸产品，其特点为：结构紧凑、体积小[宽 254(3P)×324(4P)高 320×深 250(三极)]。

(2) 除分断能力高外，尚可下进线。

(3) 欠电压脱扣器、分励脱扣器、合闸电磁铁均可长时间通电，提高了可靠性。

(4) 控制器功能全，除能满足三段保护、接地故障保护、剩余电流保护、电流不平衡保护功能外，还带有 MCR、负载监控、过载预报警，控制器试验，控制器自诊断、热记忆、信号报警、测量与显示、通信功能等多种实用功能。

(5) 通信功能完善，控制器内置串行 RS485 通信接口，可采用 Modbus-RTU 规约来实现通信，也可通过外加（或内置）协议转换模块实现 DeviceNet（或 Profibus-DP）规约的通信，满足不同的数据交换要求。

断路器的外形见图 2.5-13。

DW450 万能式断路器的技术参数如下：

额定工作电压 U_N (V)：400。

额定绝缘电压 U_i (V)：690。

额定电流等级 I_N (A)：200，400，630，800，1000，1250，1600。

极限短路分断能力 I_{cu} (kA)：55/60。

额定运行短路分断能力 I_{cs} (kA)：42。



图 2.5-13 DW450 万能式断路器外形

额定短时耐受电流 I_{cw} : 42kA, 1s。

操作性能次数: 通电, 500; 不通电, 600。

飞弧距离: 0。

质量(kg): 固定式(3P)40/(4P)48, 抽屉式(3P)46/(4P)60。

3.2.1.3 DW50 万能式断路器

该产品为 DW15HH 系列万能式断路器的下延伸产品, 其特点为结构模块化, 断路器的外形见图 2.5-14。

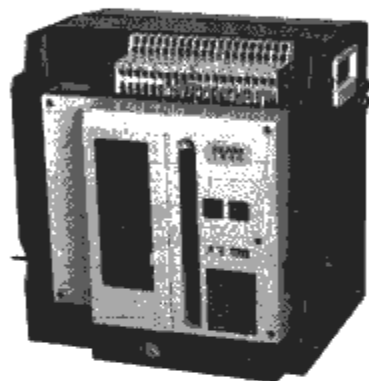


图 2.5-14 DW50 万能式断路器外形

(1) 触头系统模块化。提高了短路分断能力同时保证了下进线短路分断能力, 缩小了触头系统所占空间, 节省了基座模具的开制费用并缩短了加工周期, 从而提高了经济性。

(2) 欠电压脱扣器和分励脱扣器模块化。独特的一体化结构, 使其小型化; 实现了真正的无声运行; 欠电压脱扣器有自吸式功能; 在高压下工作线圈不过热, 在低压时能可靠闭合。

(3) 触头系统新型化。采用了新型化的触头系统, 有利于提高 I_{cw} ; 降低了整体高度。

(4) 操动机构和储能机构合二为一。实现了储能功能与闭合功能均在同一套机构完成, 使操作简练可靠、体积小, 降低了成本。

(5) 操动机构具有一套五功能的结构件。保证触头可靠闭合, 悬臂上的防回弹片使分断过程中触头不反弹, 闭合时防止主轴再转动, 可指示“合”、“分”两种状态, 在断路器闭合、断开时可靠地接通与断开辅助触头。

DW50 断路器结构紧凑, 体积小, 断路器的外形尺寸(mm)如下:

宽 $\begin{matrix} 284(3P) \\ 354(4P) \end{matrix}$ × 高 361.8 × 深 323

DW50 断路器辅助电路隔离接插件新型化, 方便了用户接线, 且其采用拼装式结构、互换性强。

DW50 断路器的技术参数如下:

额定电压 U_N (V): 380(400)。

额定绝缘电压 U_{im} (V): 690。

壳架等级额定电流 I_{Nm} (A): 1250。

额定电流 I_N (A): 200, 400, 630, 800, 1000。

额定极限短路分断能力 I_{cu} (kA): 42。

额定运行短路分断能力 I_{cs} (kA): 30。

额定短时耐受电流 I_{cw} (kA): (0.5s): 30。

进线方式: 上进线或下进线。

操作性能次数: 通电不通电 500。

飞弧距离: 0。

质量(3P/4P)(kg): 固定式 30/40, 抽屉式 46/60。

3.2.1.4 CW2 系列万能式断路器

CW2 系列万能式断路器是常熟开关制造公司(原常熟开关厂)在 CW1 万能式断路器基础上开发的新一代智能型万能式断路器, 可取代 CW1 系列。该系列产品设计人性化、使用简便, 具有全智能、高分析、零飞弧、带隔离等优点。额定工作电压 400V、690V, 额定电流至 6300A。分四个壳架等级, 断路器外形见图 2.5-15。

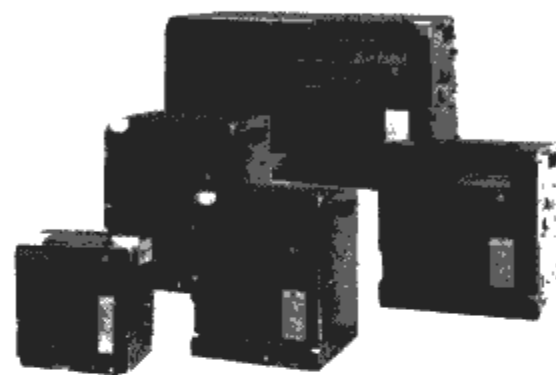


图 2.5-15 CW2 系列万能式断路器外形

该系列断路器的特点是:

(1) 高性能、体积小。CW2-1600 断路器的宽度为 248(3P)可安装于 400mm 宽的开关框中。CW2-6300 的宽度为 767(3P)可安装于 1000mm 宽的开关框中, 对设计小体积框有重要意义。

(2) 更高的分断和短时耐受电流达 $I_{cu} = 120kA$, $I_{cw} = 100kA$ 。

(3) 有清晰的合闸准备就绪指示, 确保安全操作, 可靠运行。

(4) 更完善的保护和全选择性。采用区域联锁可确保全选择性, 减小母排的热应力危害。

(5) 易于集成, 轻松实现网络管理。采用开放式 Modbus-RTU 通信协议, 可通过适配器连接 Profibus、DeviceNet 现场总线, 方便用户进行集成管理。其新型控制器, 体积小, 功能全, 有六种型式供用户选择, 即: L25, M25, M26, G26, P25, P26。P25 和 P26 除能实现三段外, 还具有电流、电压、功率、功率因数、频率、电量等测量功能, 以及参数菜单式连续设定、液晶(LCD)显示、根据需要还可选择谐波分析功能、电流不平衡报警及通信功能。

(6) 附件齐全。诸如合闸电磁铁、分励脱扣器、欠电压脱扣器、辅助开关、安全挂锁装置、电源模块、抽屉座电气指示装置、通信模块合闸就绪电气模块、外接中性线电流互感器, 断路器间钢缆和联杆联锁装置、各种锁定装置、计数器、相间隔板等, 一应俱全、供用户选择安装。

CW2 系列断路器的主要技术数据和外形尺寸见表 2.5-5。

CW2 系列断路器的功耗(+40℃)见表 2.5-6, 它是在断路器通以 I_{Nm} 情况下的总损耗。

表 2.5-5

CW2 系列万能式断路器主要技术数据

型 号				CW2-1600	CW2-2000	CW2-2500	CW2-4000				CW2-6300				
壳架等级额定电流 $I_{\text{m}}(\text{A})$				1600	2000	2500	4000				6300				
额定工作电流 I_{N} (A)				200,400,630,800, 1000,1250,1600	630,800,1000, 1250,1600,2000	1250,1600, 2000,2500	2000	2500	2900	3200	3600	4000	4000	5000	6300
额定工作电压 $U_{\text{N}}(\text{V})$				400,690/50Hz	400,690/50Hz		400,690/50Hz								
额定绝缘电压 $U_{\text{i}}(\text{V})$				1000	1000		1000								
额定冲击耐受电压 $U_{\text{imp}}(\text{kV})$				12	12		12								
工频耐受电压 $U(\text{V})(1\text{min})$				3500	3500		3500								
极 数(P)				3, 4	3, 4		3, 4								
N 极额定电流(A)				100% I_{N}	100% I_{N}		100% I_{N}								
额定极限短路分断能力 I_{cs} (kA)(有效值)		AC 400V		50	80	85	100				120				
		AC 690V		25	50	50	75				85				
额定运行短路分断能力 $I_{\text{cs}}(\text{kA})(\text{有效值})$		AC 400V		50	80	85	100				120				
		AC690V		25	50	50	75				85				
额定短路接通能力 $I_{\text{cm}}(\text{kA})(\text{峰值})$		AC 400V		105	176	187	220				264				
		AC 690V		52.5	105	105	165				187				
额定短时耐受电流 (0.5s) $I_{\text{cw}}(\text{kA})(\text{有效值})$		AC 400V		42	60	65	85				100				
		AC 690V		25	40	50	75				85				
全分断时间(无附加延时)(ms)				25~30	25~30		25~30								
闭合时间(ms)				最大 70	最大 70		最大 70								
智能控制器		L25 型		○	○		○								
		M25 型		○	○		○								
		M26 型		○	○		○								
		H26 型		○	○		○								
		P25 型		○	○		○								
		P26 型		○	○		○								
操作性能 (次)	电气 寿命	AC 400V		6500	6500	5000	1500				1000				
		AC 690V		3000	3000	2500	1000				800				
	机械 寿命	免维护		15 000	15 000	15 000	10 000				5000				
		有维护		30 000	30 000	30 000	20 000				10 000				
外形尺寸 $W \times H \times D$ (mm×mm×mm)		抽 屉 式	水平 连接	3P	248×351.5×297	347×438×390	347×438×390	401×438×395				767×475.5×395			
				4P	318×351.5×297	442×438×390	442×438×390	514×438×395				993×475.5×395			
			垂直 连接	3P	248×351.5×297	347×438×390	347×438×390	401×438×395				767×475.5×395			
				4P	318×351.5×297	442×438×390	442×438×390	514×438×395				993×475.5×395			
		固 定 式	水平 连接	3P	254×320×197	362×395×290	362×395×290	414×395×290				782×395×290			
				4P	324×320×197	457×395×290	457×395×290	527×395×290				1008×395×290			
			垂直 连接	3P	254×320×197	362×395×290									
				4P	324×320×197	457×395×290									

注 1. $I_N=200\text{A}$, 400A , 630A , 800A , 1000A 断路器具有电动机保护型, 其 $U_N=400\text{V}$ 。

2. $I_N=630\text{A}$, 800A , 1000A 断路器具有电动机保护型, 其 $U_N=400\text{V}$ 。

3. CW2-6300, $I_N=6300\text{A}$ 抽屉式断路器供应连接方式为垂直连接。

表 2.5-6

CW2 系列断路器的功耗

型 号	功 耗 (W)	
	固定式	抽屉式
CW2-1600	146	161
CW2-2000	285	365
CW2-2500	445	492
CW2-4000	795	852
CW2-6300	874	924

3.2.1.5 HSW6 系列万能式断路器

HSW6 系列万能式断路器是杭申控股集团、杭州之江开关股份有限公司最近在 HSW1 基础上开发的新一代智能型万能式断路器。该系列产品功能完善、技术先进、结构新颖、外形美观。全系列产品设计人性化、使用简便、具有全智能、高分断、无飞弧, 具有隔离功能。塑造了新一代断路器的完美形象。HSW6 断路器的外形见图 2.5-16。

全系列分四个壳架等级，其壳架等级额定电流(A)为1600, 2500, 4000, 6300，其主要技术参数见表2.5-7。

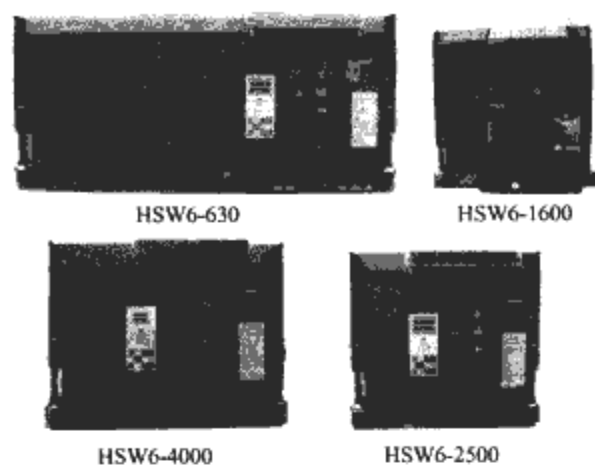


图 2.5-16 HSW6 万能式断路器外形

由于考虑了系列更新换代的继承性，具有优异的升级换代性能。HSW6-2500 断路器可直接替换原 HSW1-2000 断路器，HSWG-4000 断路器可直接替换原 HSW1-3200 断路器，无需改变开关柜内开孔尺寸。壳架等级 1600A，2500A，4000A 的断路器连接母排可以水平、垂直互换，接线方便，有利于开关柜布线。

HSW6 的短路分断能力达到国内外先进水平，全系列的短路分断能力达到 $I_{cu} = I_{cs}$ 。其中 HSW6-4000、6300 更新达到 $I_{cw} = I_{cu} = I_{cs}$ 。可以从容适用各种保护场合。

HSW6 断路器具有完善的智能控制器，除 HSW1 断路器原有功能外，增加了 ZS1 区域联锁功能、谐波监控功能（可监控 3~21 次谐波）、电流电压故障波形捕捉功能。可测量功率、功率因数、供用户分析。此外，可实现智能化网络

监控，采用开放式 Modbus-RTU 通信协议，通过适配器可连接至 Profibus DeviceNet 现场总线，方便用户进行集成管理。

3.2.1.6 Master pact MT 万能式断路器

Master pact MT 系列（简称 MT）万能式断路器是法国梅兰日兰的产品，是原 M 系列的改进提高产品，由上海施耐德配电电器有限公司引进而生产，产品外形见图 2.5-17。

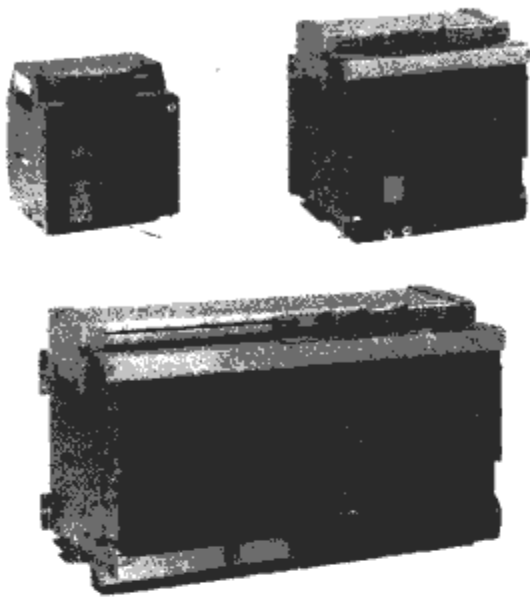


图 2.5-17 MT 断路器外形

MT 系列断路器性能优越，符合 IEC 60947-2 国际标准，短路分断能力高。它可分一般型、高分断型、超高分断型和限流型四类，其技术参数见表 2.5-8 和表 2.5-9。

表 2.5-7 HSW6 万能式断路器主要技术参数

壳架等级额定电流 I_{Nm} (A)			1600	2500	4000	6300
额定电流 (A)			200(315), 400, 630, 800, 1000, 1250, 1600	630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500	2000, 2500, 2900, 3200, 3600, 4000	4000, 5000, 6300
额定极限短路分断能力 I_{cu} (kA)	AC 400V		55/0.2	85/0.2	100/0.2	120/0.2
	AC 690V		—	—	—	—
额定运行短路分断能力 I_{cs} (kA)	AC 400V		55/0.2	85/0.2	100/0.2	120/0.2
	AC 690V		—	—	—	—
额定短时(1s)耐受电流 I_{cw} (kA)(延时 0.4s)	AC 400V		42/0.25	65/0.2	100/0.2	120/0.2
	AC 690V		—	—	—	—
额定短路接通能力 $n \times I_{cw}$ (kA)(峰值)	AC 400V		115.5	178.5	210	252
	AC 690V		—	—	—	—
额定电压 U_N (V)			400/50(60)Hz			
额定绝缘电压 U_i (V)			1000			
额定冲击耐受电压 U_{imp} (V)			12 000			
工频耐受电压 U (V)(1min)			3500			
极 数			3, 4			
全分断时间(无附加延时)(ms)			17~22			
熄弧时间(ms)			5~7			
操作性能	电气寿命	AC 400V	2500	2500	1500	500
		AC 690V	—	—	—	—
	机械寿命	免维护	8000	8000	5000	3000
		有维护	15 000	15 000	10 000	5000
外形尺寸	$W \times H \times D$ (mm×mm×mm)	抽屉式 4 极	429×354×354	354×333×398	414×333×398	788×333×398
		抽屉式 3 极	395×354×354	383×461×440	443×461×440	822×461×446
		固定式 4 极	322×247×321	449×333×398	529×333×398	903×333×398
		固定式 3 极	252×247×321	478×461×440	558×461×440	937×461×440

注 1. $I_N=200A, 400A, 630A$ 断路器具有电动机保护功能， $U_N=400V$ 。
2. I_{cu} 、 I_{cs} 、 I_{cw} 的分断能力上下进线方式相等。

该型断路器可加装2或3台间的机械联锁,也可加装与开关柜门的联锁,可为断路器实现自动切换提供成套控制装置。

该型断路器可装置不同功能的控制单元。智能型控制单元 Micrologic 具有完善的功能,配以接口附件可实现网络数据通信。按功能不同,命名各异,如 Micrologic2. OA, 其中2为基本保护(若换成5为选择型保护,6选择型保护+接地保护。7选择型+漏电保护)O为第一版本,A为电流表(换成P为功率表,H为谐波表)。

不装控制单元的无保护断路器可作为负荷开关使用。

3.2.1.7 富士 DH 万能式断路器

该断路器主回路触头采用独特的“双断点”设计,确保

在短路时的分断更快,同时减低主触头的损耗。可上下接线。由于主触头和外接线直接连接,省略了以往需要的中间连接部分,使 DH 系列断路器本体深度大大减小,成为现在世界上深度最小的断路器,可减小开关柜的体积。全系列有三个框架,3200A 及以下的断路器的高度及深度是相同的。宽度方面,标准型 800~2000A 是 354mm,2500~3200A 是 460mm。面板开孔尺寸全系列相同。断路器的深度 3200A 以下为 345,4000A 等级为 375。由于断路器有两个灭弧室,可把电弧能量在灭弧室中完全消除,故飞弧距离为零。其主要技术参数见表 2.5-10 和表 2.5-11,其外形尺寸见图 2.5-18,其内部结构见图 2.5-19。

表 2.5-10 DH800~2000 万能式断路器主要技术参数

框架尺寸		800A		1250A		1600A		2000A	
基本型号		DH083()	DH084()	DH123()	DH124()	DH163	DH164()	DH203()	DH204()
极数(P)		3	4	3	4	3	4	3	4
额定电流(A)		800		1250		1600		2000	
中性极额定电流(A)		800		1250		1600		2000	
额定绝缘电压(50/60Hz) (V)		1000		1000		1000		1000	
额定工作电压(50/60Hz) (V)		690		690		690		690	
主电路端子接线		水 平				垂 直			
质量(kg)(对于抽出式 X)		73	86	73	86	76	90	76	94
额定分断容量($I_{cs}=I_{cu}$) (对称)(kA)	690V AC	50		50		50		50	
	440V	65		65		65		65	
额定脉冲耐受电压 U_{imp} (kV)		12		12		12		12	
额定短时耐受电流 (有效值)(kA)	1s	65		65		65		65	
	3s	50		50		50		50	
最大分断时间(s)		0.03		0.03		0.03		0.03	
闭合时间(最大) (s)	弹簧储能时间	10		10		10		10	
	闭合时间	0.08		0.08		0.08		0.08	

注 (), 用安装代码替换型号中的(): 固定式, P; 带抽架的抽出式, X; 带抽架和活门的抽出式, Q。

表 2.5-11 DH2500~4000 万能式断路器主要技术参数

框架尺寸		2500A		3200A		4000A	
基本型号		DH253()	DH254()	DH303()	DH304()	DH403()	DH404()
极数(P)		3	4	3	4	3	4
额定电流(A)		2500		3200		4000	
中性极额定电流(A)		2500		3200		4000	
额定绝缘电压(50/60Hz)(V)		1000		1000		1000	
额定工作电压(50/60Hz)(V)		690		690		690	
主电路端子接线		垂 直					
质量(对于抽出式 X)(kg)		105	125	105	125	139	176
额定分断容量 $I_{cs}=I_{cu}$ (对称)(kA)	690V AC	65		65		75	
	440V	85		85		100	
额定脉冲耐受电压 U_{imp} (kV)		12		12		12	
额定短时耐受电流 I_{cw} (有效值)(kA)	1s	85		85		100	
	3s	65		65		85	
最大分断时间(s)		0.03		0.03		0.03	
闭合时间(最大) (s)	弹簧储能时间	10		10		10	
	闭合时间	0.08		0.08		0.08	

注 (), 用安装代码替换型号中的(): 固定式, P; 带抽架的抽出式, X; 带抽架和活门的抽出式, Q。

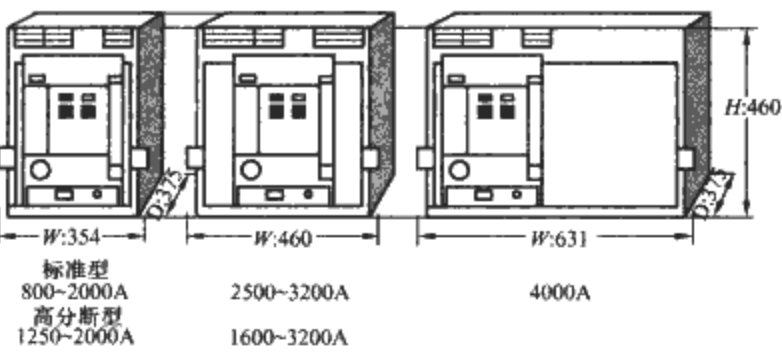


图 2.5-18 DH 断路器外形及外形尺寸

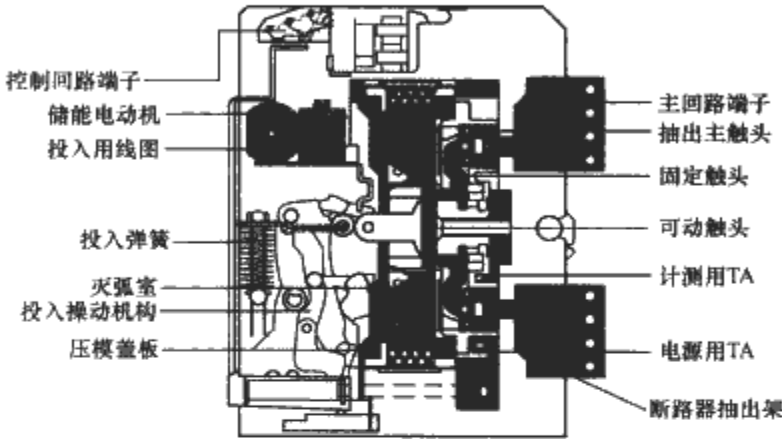


图 2.5-19 DH 断路器的内部结构

武汉武新电器工业有限公司和杭州之江开关厂及两个配套厂——锡山市宏泰电器有限责任公司、苏州吴县市开关附件厂、进行联合设计的产品。型号中 () 内填入制造厂的代号, 如 S (D) 则表示上海电器科学研究所电器开关厂的产品。S 系列产品已申请了专利并注册了商标, 其结构见图 2.5-20。

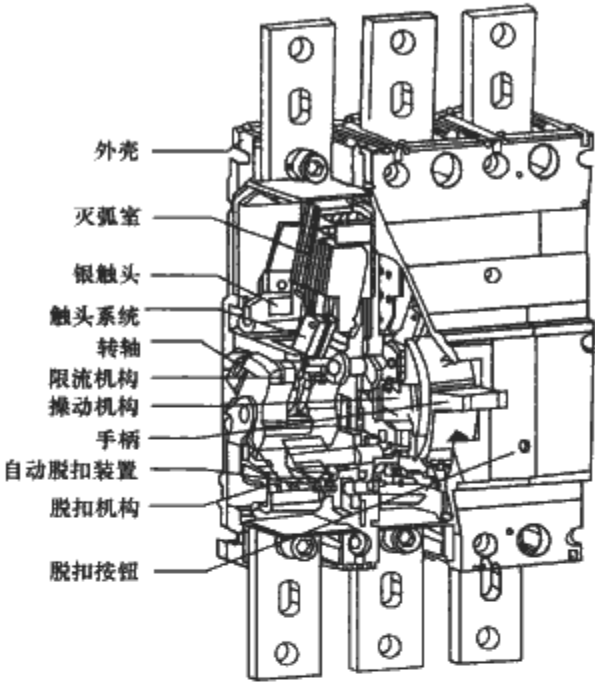


图 2.5-20 S 系列塑料外壳式断路器结构

3.2.2 塑料外壳式断路器

3.2.2.1 S 系列塑料外壳式断路器

S 系列产品由上海电器科学研究所 (含下属企业上海电器科学研究所电器开关厂)、常熟开关厂、上海华通开关厂、

S 系列断路器由灭弧室、操动机构、热磁脱扣机构、剩余电流脱扣装置及外壳等部件组成, 它们各成一独立模块, 经组装而完成整台断路器, 由于技术上的突破, 可达到零飞弧、高分断能力和高可靠性等要求。其主要技术参数见表 2.5-12。

表 2.5-12			S 系列断路器的基本参数																			
型 号			S()-100				S()-200				S()-400				S()-630				S()-800			
短路分断能力级别			C	Y	J	G	C	Y	J	G	C	Y	J	G	C	Y	J	G	C	Y	J	G
壳架等级额定电流 I_{Nm} (A)			100				200				400				630				800			
断路器额定电流 I_N (A)			16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100			40, 50, 63, 80, 100	100, 125, 160, 180, 200			200, 250, 315, 350, 400			400, 500, 630			630, 700, 800						
极 数(P)			2, 3			2, 3, 4	2, 3, 4			2, 3, 4			3, 4			3, 4						
额定极限短路分断能力 I_{cu} (有效值)(kA)	~690V	—	—	20	—	—	—	20	—	—	—	25	—	—	—	25	—	—	—	25	—	
	~400V	25	50	65	100	35	50	70	100	35	50	70	100	25	50	70	100	35	50	70	100	
	~240V	50	85	100	125	50	85	100	125	50	85	100	125	50	85	100	125	50	85	100	125	
额定运行短路分断能力 I_{cs} (有效值)(kA)	~690V	—	—	10	—	—	—	10	—	—	—	15	—	—	—	15	—	—	—	15	—	
	~400V	—	30	40	50	—	30	40	50	—	30	40	50	—	30	40	50	—	30	40	50	
保护特性		A	过载热脱扣和短路瞬时脱扣的二段保护 (瞬时脱扣器整定电流: A 为 $10I_N$, AC-3 为 $12I_N$)																			
		AC-3																				
安装方式			垂直或横装			垂直或横装			垂直或横装			垂直或横装			垂直或横装							
飞弧距离(mm)			0			0			0			0			0							
接线方式	板前接线	Q	●		●	●		●		●		●		●		●						
	板后接线	H	●		●	●		●		●		●		●		●						
	插入式接线	R	●		●	●		●		●		—		—								
	抽屉式	C	—			—			—			●			●							

续表

型 号			S()-100		S()-200	S()-400	S()-630	S()-800
附件	欠电压脱扣器	QT	●	●	●	●	●	●
	分励脱扣器	FT	●	●	●	●	●	●
	辅助触头	FC	●	●	●	●	●	●
	报警触头	BC	●	●	●	●	●	●
	电动操动机构	CD	●	●	●	●	●	●
	旋转操动手柄	CS	●	●	●	●	●	●
	附件接线端子		●	●	●	●	●	●
连接导线最大截面积(mm ²)			35		95	240	85×2	240×2
寿命次数(次)			≥8000		≥8000	≥5000	≥3000	≥3000

S系列断路器的脱扣机构包括热脱扣和电磁脱扣两部分。热脱扣由双金属片、热元件和执行元件组成。额定电流40A以上的热脱扣器为旁热式，40A以下的热脱扣器为直热式。当电路过载时双金属片受热弯曲，推动牵引杆使断路器脱扣。电磁脱扣器采用拍合式结构，由铁心和衔铁组成，结构简单，制造方便，在短路来临时由衔铁推动牵引杆使断路器脱扣。它具有过载和短路的两段保护特性。S系列断路器提供了齐全的附件，其中欠电压脱扣器、分励脱扣器、报警触头、辅助触头，100A与200A可完全通用，400A与630A，800A也可完全通用，减少了品种规格。400A，630A，800A的附件可直接在盖上安装而无需打开盖子，方便了安装且可减少安装附件过程中引起的断路器故障。各等级的板前接线分别提供了过渡铜排接头和电缆线接头。板后接线提供了板后接线座，且接线方向可水平亦可垂直。插入式接线提供插入式接线座，接线方向可水平也可垂直。630A，800A壳架的断路器考虑到插入较困难，故作成抽屉式，方便插拔。另外整个系列提供了电动操动机构和开关柜上使用的旋转手柄操动机构。

S系列的外形及安装尺寸见图 2.5-21 和表 2.5-13。

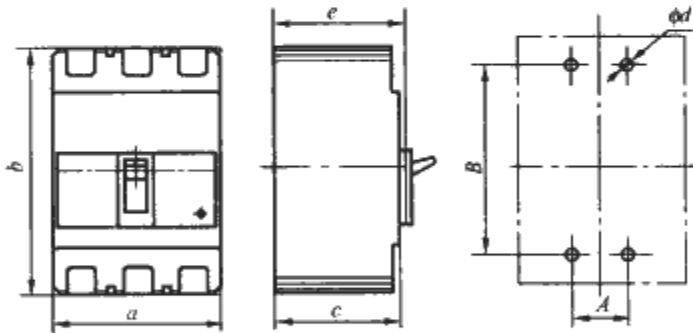


图 2.5-21 S 系列的外形和安装尺寸

表 2.5-13 S 系列的外形与安装尺寸

型 号	外形尺寸(mm)				安装尺寸(mm)		
	a	b	c	e	A	B	φd
S()-63 S()-63YL	75	130	65	69	25	11	5
S()-100C	90	155	60	64	30	132	5
S()-100Y、J			82	86	30	132	5
S()-100G	105	165	96	99.5	35	126	5
S()-200C、Y			83	86.5	35	126	5
S()-200J、G			96	99.5	35	126	5
S()-400C、Y、J、G	140	257	94.5	103	44	215	7
S()-630C、Y、J、G	210	275	94.5	103	70	243	7
S()-800C、Y、J、G	210	275	94.5	103	70	243	7

3.2.2.2 SA 系列塑壳断路器

SA 系列塑壳断路器有 100A，225A，400A，630A，800A 五个壳架等级，具有过载、短路保护和剩余电流及接地故障保护功能。其额定电流和过电流保护特性可调，能更好地与配电线路或电动机负载匹配，作为线路或电动机等设备的过载或短路保护之用。

SA 系列塑壳断路器可带通信接口，能与现场总线连接，通过计算机网络检测，计算电路的参数，监视断路器和电路的状态，并可把电路的状态传送到控制中心，进行数据通信和交换；可远距离控制断路器及快速进行故障诊断，减少停电和停机时间；也可在系统中灵活地改变断路器的参数设置，使系统达到最佳的配合。断路器外形见图 2.5-22。

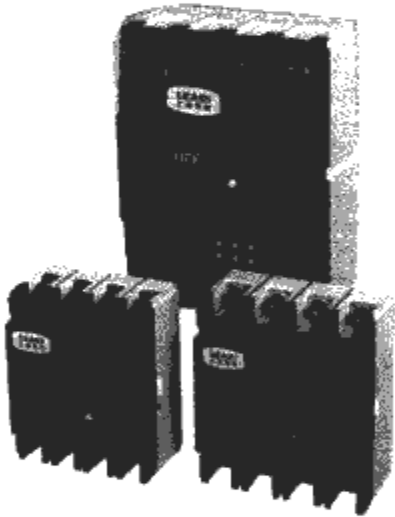


图 2.5-22 SA 系列塑料外壳式断路器外形

S 系列断路器产品的机构设计先进合理，分断速度快，脱扣力小，且采用电磁斥力限流原理，从而达到很高的短路分断能力。

SA 塑壳式断路器、SAL 剩余电流断路器和 SAL 电子式带剩余电流保护断路器成为孪生式结构，其外形尺寸和安装尺寸一样，内部结构与零件通用，有利于生产管理和使用。

SA 塑壳断路器采用结构新颖的释放式电磁脱扣器，机构紧凑，脱扣力稳定，动作不受电源电压波动的影响，动作范围广；电子线路设计采用先进的恒流稳压电路，可使电子线路一直在低电压、小电流，低功率的条件下工作，其电源电压在 200~400V 范围内工作可靠。

SA 系列塑壳断路器的技术数据：热磁式的技术数据见表 2.5-14，电子式的技术数据见表 2.5-15。

带通信接口的智能化断路器（标准型）的技术数据见表 2.5-16。

过电流脱扣器的长延时，短延时和瞬时电流整定值均可调整，满足各种保护特性要求。

外形尺寸一并列于表 2.5-16 中。

3.2.2.3 CM1 系列塑料外壳断路器

CM1 系列塑料外壳断路器是常熟开关厂自行研制开发的产品，包括：CM1-100 及 CM1-225 二极；CM1-63L、M、CM1-100L、M、H，CM1-225L、M、H，CM1-400L、M、H，CM1-630L、M、H，CM1-800M、H 三极；CM1-63、CM1-100、CM1-225、CM1-400 及 CM1-630 四极共五个壳架，23 个品种。在此基础上还按照船舶的使用要求，增补了耐盐雾、耐霉菌、耐高温、高湿及倾斜、振动等试验，派生成船用断路器。还按照核电工业的使用要求，增补了 γ 射线辐照，加速热老化及地震试验等项目，已升级为 1E 级（即核级）断路器，成为国内第一个通过核级试验的断路器。CM1 系列的外形见图 2.5-23。

CM1-63M、CM1-100M、H 及 CM1-225M、H 均为双向电动斥力触头，其余为单向电动斥力触头。CM1 产品在型式试验的极限短路分断能力试验中证明，电动斥力触头限流效果明显，双向电动斥力触头产品实际分断电流仅为预期分断电流的 30% 以下，而且断开时间（含燃弧时间）极短。这可明显减少触头的烧损，缩小飞弧距离。CM1 系列断路



图 2.5-23 CM1 系列塑料外壳式断路器外形

器采用螺管电磁脱扣器作为快速脱扣机构，当故障电流出现后，其动作时间快。CM1 主要技术性能见表 2.5-17。

CM1 系列的主要技术性能																							
壳架电流(A)		63		100					225					400				630					
型 号		CM1-63M		CM1-100C	CM1-100L	CM1-100M	CM1-100H	CM1-225C	CM1-225L	CM1-225M	CM1-225H	CM1-400C	CM1-400L	CM1-400M	CM1-630C	CM1-630L	CM1-630M						
额定电流 I_N (A)		(6), 10, 16, 20, 32, 40, 50, 63		(10), 16, 20, 32, 40, 50, 63, 80, 100					100, 125, 160, 180, 200, 225					225, 250, 315, 350, 400				400, 500, 630					
极 数(P)		3	4	3	3	4	3	3	3	3	3	4	3	3	3	4	3	3	3	4	3		
额定绝缘电压 U_i (V)		500		800																			
额定工作电压 U_N (V)		400		400, 690																			
飞弧距离(mm)		0		0(≤50)①					≤50					≤100									
极限短路分断能力 I_{cu} (kA)	AC 690V			20					20					20									
	AC 400V	50		25	35	50	85	25	35	50	85	35	50	65	35	50	65						
运行短路分断能力 I_{cs} (kA)	AC 690V					10				10				10			10						
	AC 400V	35		18	22	35	50	18	25	35	50	25	35	42	25	35	42						
操作性能 (次)	通电	6000							2000					1000									
	不通电	8500							7000					4000									
外形尺寸 (mm)	W	78	103	92	92	122	92	107	107	142	107	150	150	198	182	182	240	182					
	L	135		150		150		165		165		257				270							
	H	82		68		86		86		103		105				110							

注 极限分断与飞弧距离包含横装和竖装。
①CM1-100 飞弧距离分零飞弧与 50mm 两种，应在订货时注明，690V 规格无零飞弧。

3.2.2.4 TM40 系列塑料外壳断路器

TM40 系列断路器是天津百利电气有限公司在 TM30 系列基础上开发的新品，特点是微机控制，可实现上网通信。全系列分三个壳架等级，即 160A、250A、400（630）A。TM40 断路器可配 C、M、H 三种智能脱扣器，H1 型除 LSI 功能外可加装接地保护，H2 型则具有通信接口，协议为 Modbus。
断路器的特点和 TM30 一样，采用 CDC 新型灭弧原理，有较高的短路分断能力。
TM40 通信功能只通过外接通信模块实现。

PUIC 模块通信单元，是上位机与断路器通信的必备模块，实现底层协议与标准总线协议的转换。
PUTT 模块控制单元，与 PUIC 组合，通过安装在断路器的电动操动机构，实现计算机控制断路器分、合操作。
PUIK 模块、信号单元，与 PUIC 组合，上传整定值、电流、故障原因。同时通过连接断路器上的辅助触头上传断路器分合状态。
三个模块在同一单元壳体内以模块形式进行拼装组合。协议为 Modbus。
TM40 塑料外壳断路器的技术参数和外形尺寸见表

2.5-18, 外形见图 2.5-24。

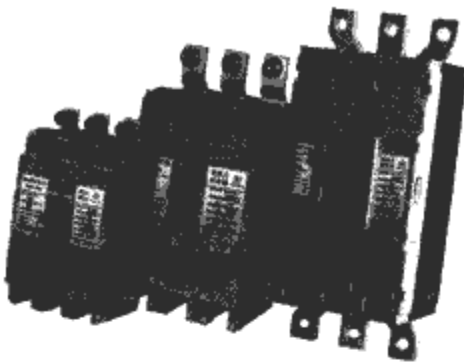


图 2.5-24 TM40 断路器结构

用性满足了系统的最大要求。以其性能优异、结构紧凑、使用方便获多项专利。全系列分 T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 七个壳架等级, 特别是 T7 型断路器, 结构紧凑, 性能非凡, 是一个真实的限流断路器。其外形见图 2.5-25。

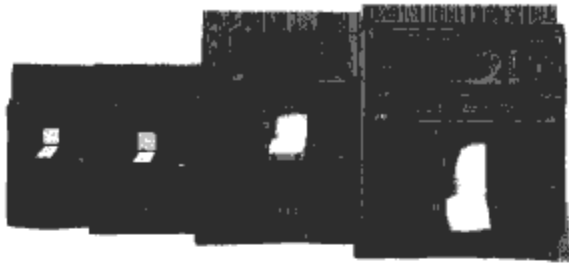


图 2.5-25 Tmax 塑料外壳式断路器外形

3.2.2.5 Tmax 系列塑料外壳断路器

Tmax 系列塑料外壳断路器是 ABB SACE 公司最新开发的新产品, 以取代 Isomax 系列。Tmax 系列以其完整、通用性满足了系统的最大要求。以其性能优异、结构紧凑、使用方便获多项专利。全系列分 T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 七个壳架等级, 特别是 T7 型断路器, 结构紧凑, 性能非凡, 是一个真实的限流断路器。其外形见图 2.5-25。

表 2.5-18 TM40 的技术参数

壳架电流 $I_N(A)(max)$		160	250	400(630)
型 号		TM40-160W	TM40-250W	TM40-400/(630)W
额定电流 $I_N(A)$		32, 50, 80, 100, 160	100, 125, 160, 200, 250	250, 315, 400(315, 400, 630)
极 数(P)		3	3	3
额定绝缘电压 $U_i(V)$		800	800	800
额定最大工作电压 $U_N(V)$		690	690	690
操作次数	通电次数	6000	2000	1000
	不通电次数	8500	7000	4000
分断能力 AC 400V	$I_{cu}(kA)$	50	50	65
	$I_{cs}/I_{cu}(\%)$	100	100	100
额定短时耐受电流 $I_{cw}(kA)$		2	3	5(400)8(630)
使用类别		B	B	B
附件形式		分励, 辅助, 报警, 欠电压	分励, 辅助, 报警, 欠电压	分励, 辅助, 报警, 欠电压
外形尺寸(mm)	L	155	165	257
	W	90	105	140
	H	109	129	165

表 2.5-19 Tmax 塑料外壳式断路器的主要技术数据

型 号		Tmax T1 1P	Tmax T1	Tmax T2	Tmax T3	Tmax T4	Tmax T5	Tmax T6
额定电流 $I_N(A)$		160	160	160	250	250/320	400/630	630/800/1000
极数(P)		1	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4
额定工作电压 $U_N(V)$	AC 50~60Hz	240	690	690	690	690	690	690
	DC	125	500	500	500	750	750	750
额定脉冲耐压(kV)		8	8	8	8	8	8	8
额定绝缘电压 $U_i(V)$		500	800	800	800	1000	1000	1000
额定 极限 短路 分断 能力 $I_{cu}(kA)$	等 级	B	B C N	N S H L	N S	N S H L V	N S H L V	N S H L
	AC 50~60Hz 440V		10 15 22	30 45 55 75	25 40	30 40 65 100 180	30 40 65 100 180	30 45 50 80
	AC 50~60Hz 690V		3 4 6	6 7 8 10	5 8	20 25 40 70 80	20 25 40 70 80	20 22 25 30
	DC 500V 2P		— — —	— — — —	— —	25 36 50 70 100	25 36 50 70 100	20 35 50 65
	DC 500V 3P		16 25 36	36 50 70 85	36 50	— — — — —	— — — — —	— — — —
额定运行短 路分断能力 $I_{cs}(\%I_{cu})$	AC 50~60Hz 440V		100 75 50	100 100 100 75	75 50	100 100 100 100 100	100 100 100 100 100	100 100 100 100
	AC 50~60Hz 690V		100 75 50	100 100 100 75	75 50	100 100 100 100 100	100 100 100 100 100	75 75 75 75

续表

型 号		Tmax T1 1P	Tmax T1	Tmax T2	Tmax T3	Tmax T4	Tmax T5	Tmax T6
断开时间(ms)		7	7, 6, 5	3, 3, 3, 3	7, 6	5, 5, 5, 5, 6	6, 6, 6, 6, 6	10, 9, 8, 7
使用类别		A	A	A	A	A	B(400A), A(630A)	B(630A, 800A), A(630A)
脱扣单元		热磁式(T2160 有电子式)			热磁式或电子式(PR 型脱扣器)			
型式		F	F	F, P	F, P	F, P, W	F, P, W	F, W
机械寿命	操作次数	25 000	25 000	25 000	25 000	2000	2000	2000
	每小时操作次数	240	240	240	240	240	120	120
电寿命 (415V AC)	操作次数	8000	8000	8000	8000	8000(250A), 6000(320A)	7000(400A), 5000(630A)	7000(630A), 6000(320A)
	每小时操作次数	120	120	120	120	120	60	60
外形尺寸 (mm)	W	25.4(1P)	76	90	105	105	140	210
	W(4P)	—	102	120	140	140	184	280
	D	70	70	70	70	103.5	103.5	103.5
	H	130	130	130	150	205	205	268
质量 (kg)	固定式	0.4(1P)	0.9/1.2	1.1/1.5	1.5/2	2.35/3.05	3.25/4.15	9.5/12
	插入式	—	—	1.5/1.9	2.7/3.7	3.6/4.65	5.15/6.65	—
	抽出式	—	—	—	—	3.85/4.9	5.4/6.9	12.1/15.1

断路器除有热磁（可调）脱扣器外，尚有性能优越的 PR231、PR331、PR332 智能脱扣器可达到各种典型的保护特性。具有电压模块和通信模块支持 Modbus RTV 规约，实现现代通信要求。外形尺寸和质量见表 2.5-19。

3.2.2.6 NS 系列塑料外壳断路器

NS 系列塑料外壳是施耐德电气公司梅兰日兰的最新产品。全系列额定电流 80~1250A 全系列分六个壳架等级，每个等级按短路分断能力分为 N（正常）、H（高分断）和 L（限流型）三个品种，具有固定式和抽屉式结构，外形见图 2.5-26 和图 2.5-27。



图 2.5-26 NS 塑壳断路器（固定式）外形

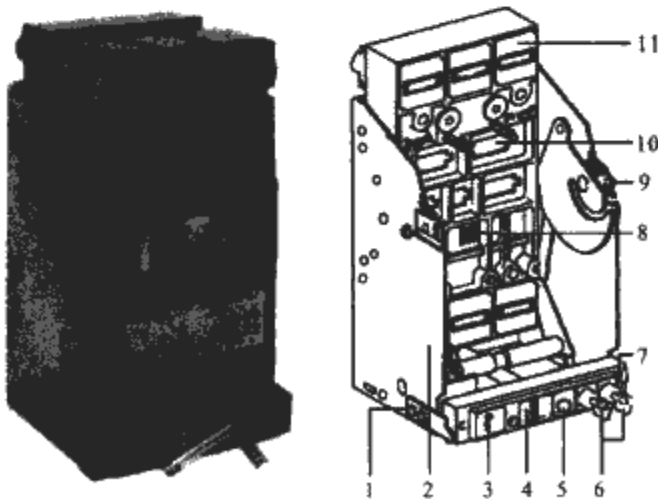


图 2.5-27 NS 塑壳断路器（抽屉式）外形

过电流脱扣器有 STR 电子脱扣器，TM 型热磁脱扣器，MP 型电磁脱扣器，Vigi 接地故障模块。电动机保护断路器

可用于与 TE 热继电器配合。

由于采用了旋转式双断触头和灭弧系统，短路分断能力极高，其主要技术参数见表 2.5-20。

3.2.3 直流快速断路器

直流快速断路器主要用于额定电压为直流 1500V 及以下，额定电流至 6000A 地铁、轻轨车辆，工矿电力机车及铁路牵引机车中作为主电路短路与过载保护之用，也可用于轧钢、采矿等工业领域整流和直流电动机的保护开关。小容量断路器也可用于小型直流馈电装置的分级保护断路器。以下介绍的几个产品由上海新联直流电器有限公司制造。

3.2.3.1 QSD8（15）直流快速断路器

型号中 Q 表示牵引用，SD 表示快速直流，8 表示用于额定电压 800V，15 表示用于额定电压 1500V。断路器的结构如图 2.5-28 所示。

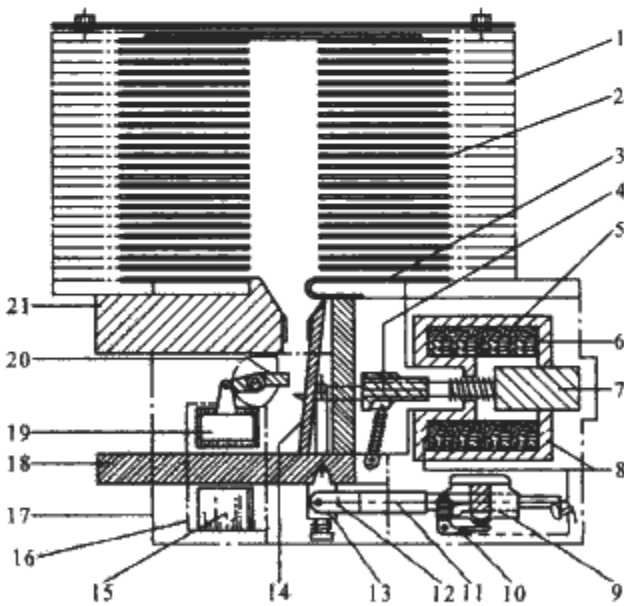


图 2.5-28 QSD8 直流快速断路器的结构图
1—隔弧板；2—栅片；3—弧角；4—叉杆；5—弹簧；6—线圈；7—动铁心；8—圆管；9—辅助触头；10—操作杆；11—圆轴；12—叉形件；13—轴套；14—动触头；15—脱扣静铁心；16—壳体；17—底座；18—下汇流排；19—脱扣动铁心；20—脱扣杆；21—上汇流排

表 2.5-20 施耐德电气 (Schneider Electric) NS 系列塑壳断路器主要技术参数

产品型号			NS100			NS160			NS250			NS400			NS630			NS800		NS1000		NS1250	
极数(P)			3, 4			3, 4			3, 4			3, 4			3, 4			3, 4			3, 4		
额定电流 (A)			100			160			250			400			630			800		1000		1250	
额定绝缘电压 U_i (V)			750			750			750			750			750			750			750		
额定冲击电压 i_{mp} (kV)			8			8			8			8			8			8			8		
额定工作电压 U_N (V)			690			690			690			690			690			690			690		
额定极限短路分断能力 I_{cu} (kA)		等级	N	H	L	N	H	L	N	H	L	N	H	L	N	H	L	N	H	L	N	H	
		415V	25	50	150	36	70	150	36	70	150	45	70	150	45	70	150	50	70	150	50	70	
		690V	8	10	75	8	10	75	8	10	20	10	20	75	10	20	35	30	42	25	30	42	
运行短路能力 I_{cs} (% I_{cu})			100			100			100			100			100			75		50		100	
直流分断能力(kA)		250V 1P	50	85	100	50	85	100	50	85	100		85			85							
		500V 2P	50	85	100	50	85	100	50	85	100		85			85							
短延时 I_{st}			(1.5~10) I_N 可调, 50ms																				
隔离功能			✓			✓			✓			✓			✓			✓			✓		
寿命(次)		总次数	10 000(50 000)			8000(40 000)			8000(20 000)			5000(15 000)			5000(15 000)			(10 000)			(10 000)		
		电寿命	1500(30 000)			1000(2000)			1000(10 000)			1000(6000)			1000(4000)			(5000)			(4000)		
保护单元			热磁可调 电子可调			热磁可调 电子可调			热磁可调 电子可调			热磁电子可调			热磁可调 电子可调			电子可调			电子可调		
外形尺寸 (mm)		宽 W	3P	105			105			105			140			140			210			210	
			4P	140			140			140			185			185			280			280	
		深 D		86			86			86			110			110			147			147	
		高 H		161			161			161			255			255			32			7327	
单位体积分断能力(A/mm ³)			17.2	481	103.2	24.8	48.1	103.2	24.8	48.1	103.2	11.5	17.8	38.2	11.5	17.8	38.2	5.0	6.9	14.9	5.0	6.9	

注 1. 使用类别: 壳架电流 400A 以下均为 A, 壳架电流 400A 以上(含 400A)电子脱扣器产品为 B。
2. 寿命: ()内数值为最大期望维护值。
3. 电子脱扣器产品无直流分断能力。

QSD8 (15) 型断路器为单极, 无极性。其显著特点是模块结构, 它由下列模块组成: 触头导电回路, 闭合保持装置, 直接瞬时过电流脱扣装置, 灭弧罩及辅助触头盒。

断路器闭合保持装置采用螺管式电磁铁, 按下闭合按钮, 线圈 6 得电, 动铁心 7 通过叉杆 4 驱使动触头 14 与静触头接触, 经 0.5s 自动接入经济电阻, 铁心 7 和动触头 14 保持在闭合位置。要断开则按下分断按钮, 使线圈 6 断电, 恢复弹簧与迫使铁心 7 和叉杆复位, 动触头 14 断开。

当发生过载或短路时, 流过电流大于动作整定值, 脱扣动铁心 19 动作, 带动脱扣杆 20 动作, 迫使叉杆 4 向下释放动触头断开, 动触头断开产生的电弧与主电路自磁场的作用, 将电弧吹入灭弧室, 灭弧室的金属钢片将电弧分隔或许多短弧, 并在隔离板中去游离, 将电弧熄灭。

QSD8 直流快速断路器的主要技术参数见表 2.5-21。

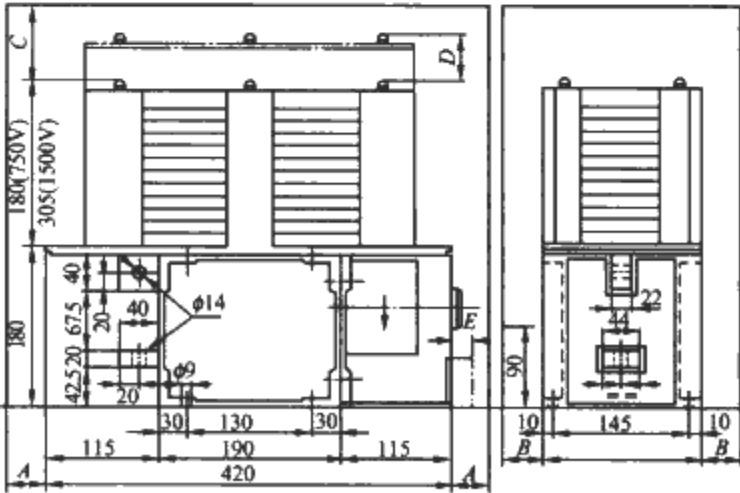


图 2.5-29 QSD8 的外形尺寸

QSD8 直流快速断路器的外形尺寸见图 2.5-29。

表 2.5-21 QSD8 直流快速断路器的主要技术参数

项 目	技术数据	
额定电压 U_N (V)	1500	750
额定电流 I_N (A)	1250	
最大工作电压 (V)	1800	900
最大分断能力 (kA)	30($t=15ms$)	
分断过电压	(1.5~3.1) U_N	
固有动作时间 (ms)	2~3	
电流整定范围 (kA)	0.6~1.25, 0.9~1.8, 1.25~2.5	
电寿命(次)	1000	
机械寿命(次)	30 000	
操作电压 (V)	DC 220, 110, 50	
辅助触头数量	6 动合, 6 动断	
辅助触头容量	AC 220V 10A, DC 110V 1A	
外形尺寸 (mm)	420×165×485	420×165×345
安装尺寸 (mm)	4× $\phi 9$, 130×145	
质量 (kg)	37	27

3.2.3.2 DS12-10/08 (20/08, 30/08, 60/08) 直流快速断路器

DS12 系列为 8kV, 1000A、2000A 断路器采用单极转动式触头, 3000A 和 6300A 断路器采用桥式双断触头。它具有结构紧凑、体积小、质量轻、操动机构灵巧、分断能力高的特点, 与国内同类型产品相比有如下优点:

(1) 体积比国内目前生产的 DS1, DS7, DS10, DS11 系列小 1/2。

(2) 质量比国内目前生产的 DS1, DS7, DS10, D11 轻 1/2 左右。

(3) 采用机械保持方法, 在使用中不消耗电能, 过电流脱扣不受辅助电源电压变化的影响。

(4) 灭弧室为过内首创, 具有分断能力高, 过电压低, 灭弧性能稳定等优点, 实际全分断时间小于 20ms, 过电压小于 2 倍。

(5) 3000A 和 6000A 断路器采用桥式双断点触头, 具有结构紧凑、操作灵巧、短路分断能力高的特性。

(6) 3000~6000A 断路器均采用自然冷却, 而不采用强迫风冷或水冷却, 不但使用方便, 而且节约能源。

(7) 无方向性, 两方向动作电流值一样。

(8) 可以带有过电流脱扣, 欠电压脱扣。

(9) 合闸功率小, 不需要附加整流设备, 操作简单。

DS12-10/8(20/8)断路器结构见图 2.5-30。DS12-30/08、60/08 结构见图 2.5-31。

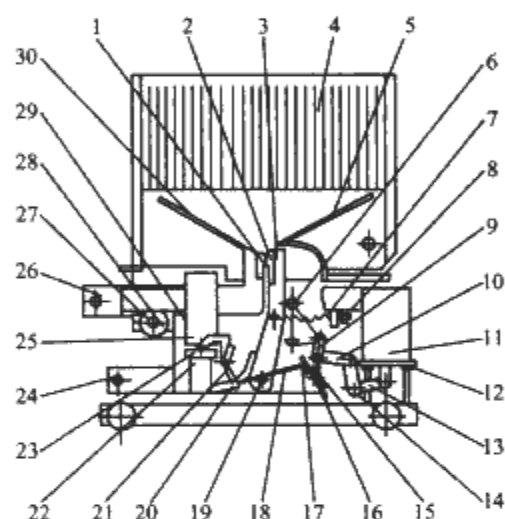


图 2.5-30 DS12-10/8 (20/8) 结构图

1—静触头；2—动触头；3—动触头臂；4—弧室；
5, 30—弧角；6—直角杠杆；7—主弹簧；8, 20—
螺母；9, 10, 15, 18—连杆；11—合闸电磁铁；
12, 29—垫片；13, 14, 21—杠杆；16—锁片；
17—半圆轴；19—主轴；22—保持磁铁；23—冲击
衔铁；24, 26—汇流排；25—脱扣磁铁；27—螺
钉；28—指示盘

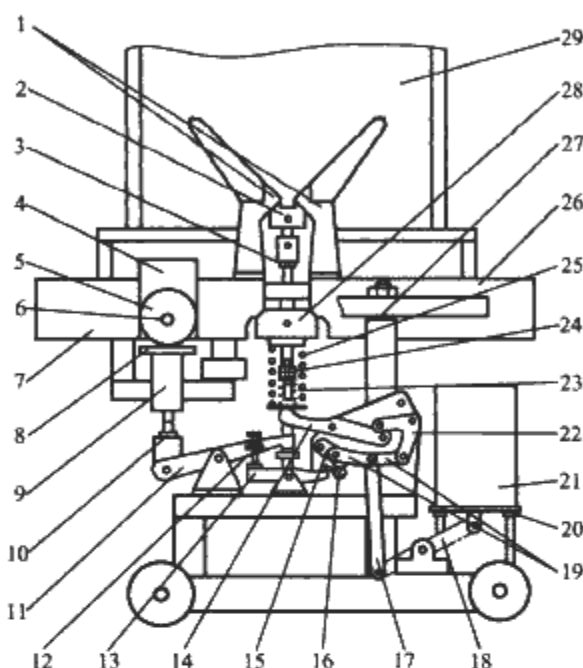


图 2.5-31 DS12-30/08 (60/08)

直流快速断路器结构图

1—弧静触头；2—弧动触头；3，10，24—螺母；4—脱扣磁铁；5—指示盘；6，12—螺钉；7，26—出线排；8—冲击衔铁；9—保持磁铁；11—脱扣杠杆；13—弯板；14，18—杠杆；15—锁片；16—半圆轴；17—拉杆；19—连杆；20，27—垫圈；21—合闸电磁铁；22—直角杠杆；23—分闸弹簧；25—压力弹簧；28—主动触头；29—弧室

DS12 断路器主要技术数据见表 2.5-22。

DS12-10/08 (20/08) 断路器外形及安装尺寸见图 2.5-32。

DS12-30/08 直流快速断路器的外形尺寸见图 2.5-33。

DS12-60/08 直流快速断路器的外形尺寸见图 2.5-34。

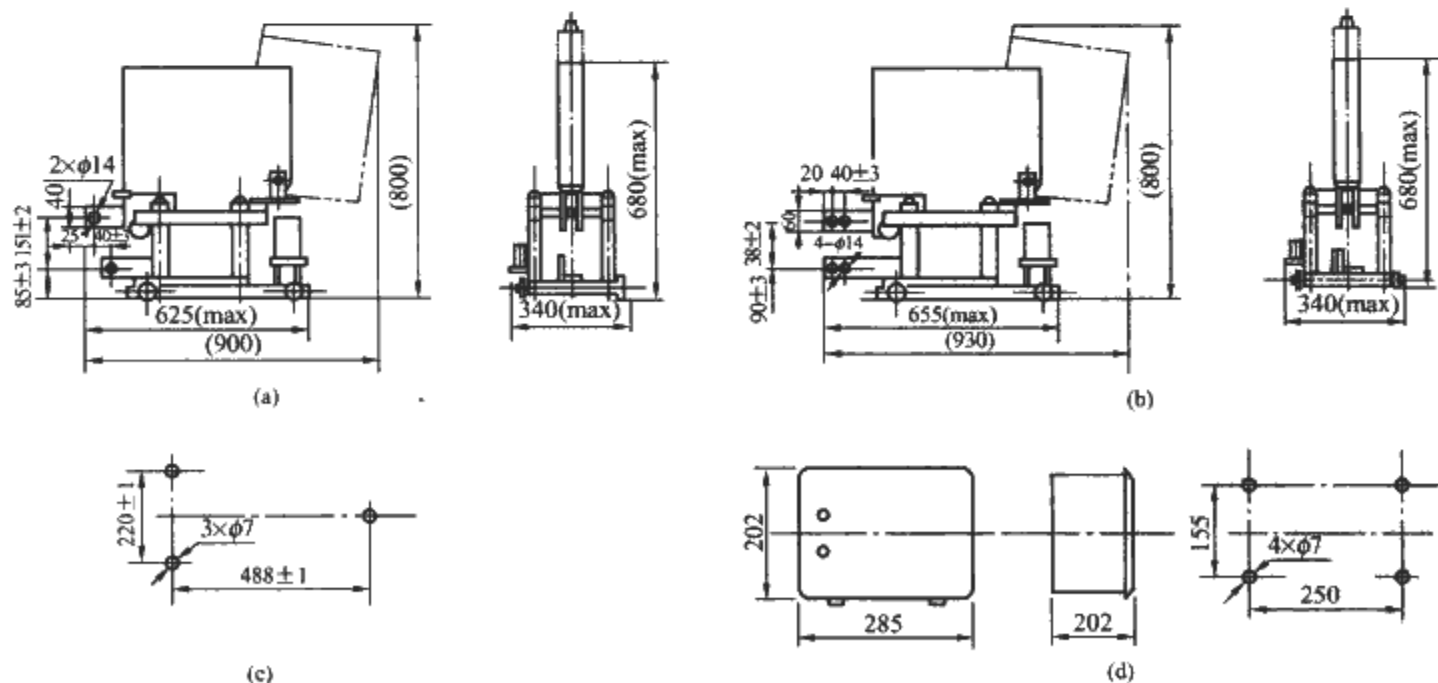


图 2.5-32 DS12-10/08 (20/08) 直流快速断路器的外形及安装尺寸
(a) DS12-10/08; (b) DS12-20/08; (c) 安装尺寸; (d) 操作箱及外形尺寸

表 2.5-22 DS12 断路器技术数据

项 目	DS12-10/08	DS12-20/08	DS12-30/08	DS12-60/08
额定电压 U_N (V)	800	800	800	800
最高工作电压(V)	900	900	900	900
额定电流(A)	1000	2000	3000	6000
整定电流范围(A)	800~2000	1600~4000	2400~6000	4800~12 000
分断能力(kA)	40($di/dt=3\times10^6$ A/s)	40($di/dt=3\times10^6$ A/s)	50($di/dt=3\times10^6$ A/s)	50($di/dt=3\times10^6$ A/s)
分断时过电压/ 试验电压(kV)	≤ 3	≤ 3	≤ 3	
全分断时间(ms)	≤ 30	≤ 30	≤ 20	
限流系数	<0.7	<0.7	0.60	
机械寿命(次)	5000		5000	5000
主弧触头开距(mm)	≥ 26		≥ 12.5 ≥ 10	≥ 12.5 ≥ 10
主弧触头压力(N)	190±20	210±25	4214±490 1176±294	11 760±980 1176±294
控制功率(瞬时)	$\frac{AC}{DC}$ 220V <20 A	$\frac{AC}{DC}$ 220V <20 A	$\frac{AC}{DC}$ 220V <20 A	$\frac{AC}{DC}$ 220V <20 A
质量(kg)	≈ 63	≈ 70	≈ 124	≈ 174
分励操作动作时间(ms)	≈ 30		≈ 30	
闭合操作动作时间(ms)	≈ 110		≈ 110	

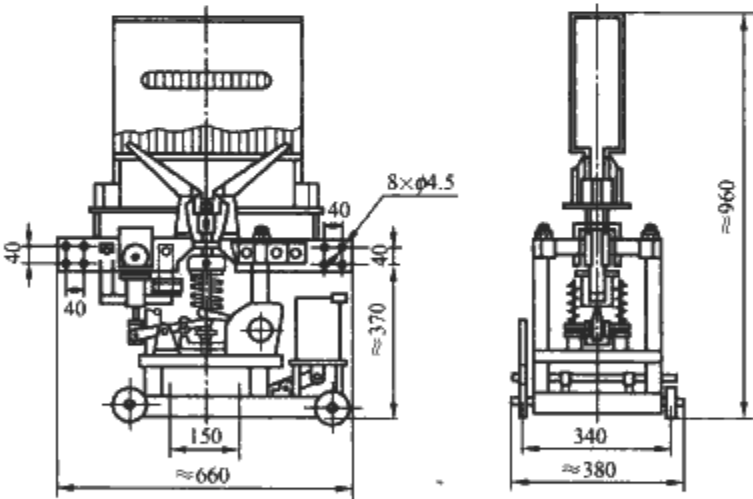


图 2.5-33 DS12-30/08 直流快速断路器的外形尺寸

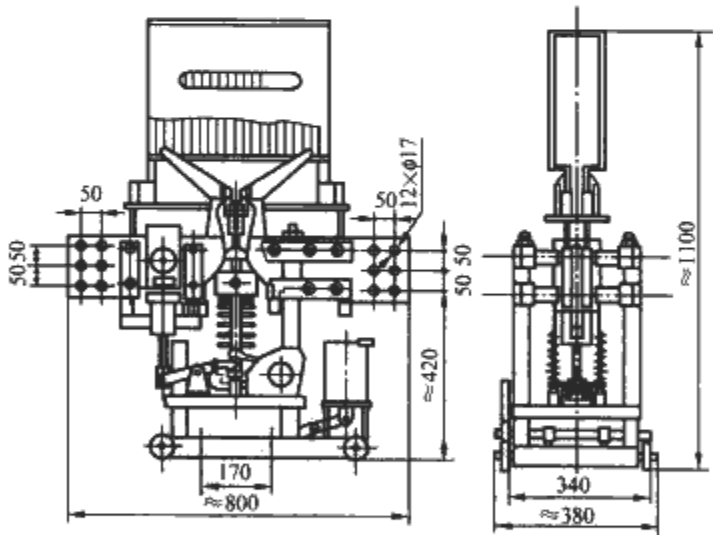


图 2.5-34 DS12-60/08 直流快速断路器的外形尺寸

3.2.3.3 DS14-10/15 (20/15) 直流快速断路器

该系列额定电压 15kV，额定电流 (A) 分 1000，2000，3150，6300 四个等级。

DS14 系列中采用单极转动式触头，3150A、6300A 断路器采用桥式双断点触头，具有结构紧凑、体积小、质量轻、操动机构灵巧、分断能力高的特点，与国内同类型产品相比有如下优点：

(1) 采用机械保持方法，在使用中不消耗电能，过电流脱扣不受辅助电源电压变化的影响。

(2) 无方向性，两方向动作电流值一样。

(3) 可以带有分励脱扣，欠电压脱扣，电动力脱扣装置。

(4) 合闸功率小，采用螺管式电磁铁合闸，是短时工作制，有一套自动切断控制装置，使合闸时间与操作无关。不需附加整流设备，操作简单。

断路器主要由灭弧室、机架、操动机构和导电系统组成。断路器主要技术数据见表 2.5-23，断路器结构见图 2.5-35~图 2.5-38。

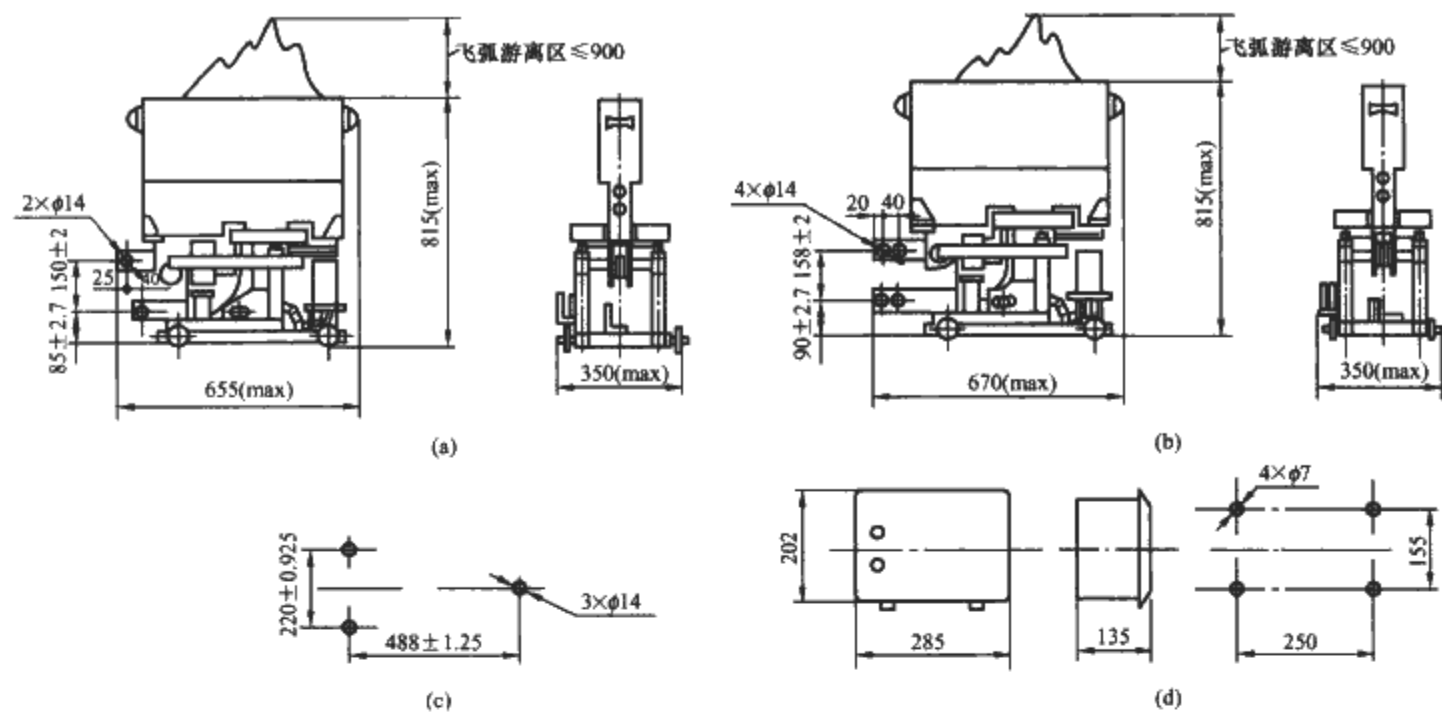


图 2.5-35 DS14-10/15 (20/15) 直流快速断路器结构图
(a) DS14-10/15; (b) DS14-20/15; (c) 安装尺寸; (d) 操作箱及外形尺寸

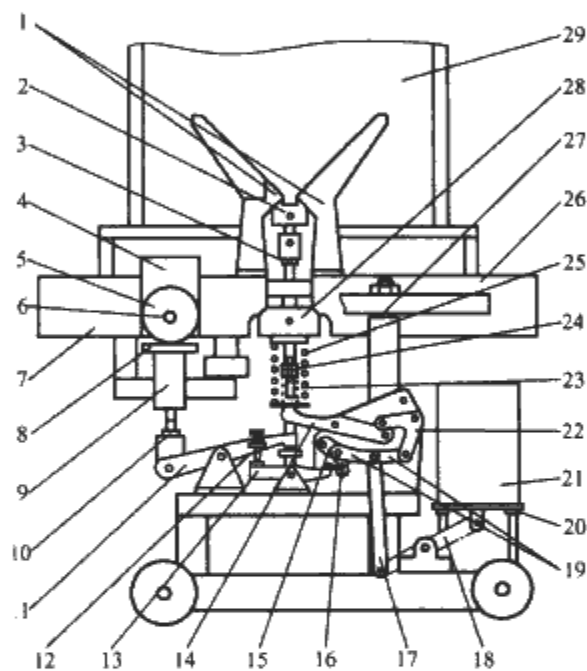


图 2.5-36 DS14-30/15 (20/15)
直流快速断路器结构图

1—弧静触头; 2—弧动触头; 3, 10, 24—螺母; 4—脱扣磁铁; 5—指示盘; 6, 12—螺钉; 7, 26—出线排; 8—冲击衔铁; 9—保持磁铁; 11—脱扣杠杆; 13—弯板; 14, 18—杠杆; 15—锁片; 16—半圆轴; 17—拉杆; 19—连杆; 20, 27—垫圈; 21—合闸电磁铁; 22—直角杠杆; 23—分闸弹簧; 25—压力弹簧; 28—主动触头; 29—弧室

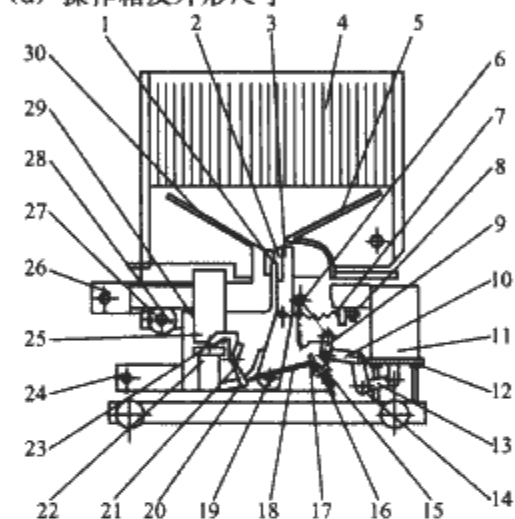


图 2.5-37 DS14-10/15 (20/15) 直流快速断路器外形及安装尺寸
1—静触头; 2—动触头; 3—动触头臂; 4—弧室; 5, 30—弧角; 6—吹弧铁心; 7—主弹簧; 8, 20—螺母; 9, 10, 15, 18—连杆; 11—合闸电磁铁; 12, 29—垫片; 13, 14, 21—杠杆; 16—锁片; 17—半圆轴; 19—主轴; 22—保持铁心; 23—冲击衔铁; 24, 26—汇流排; 25—吸引铁心; 27—螺钉; 28—指示盘

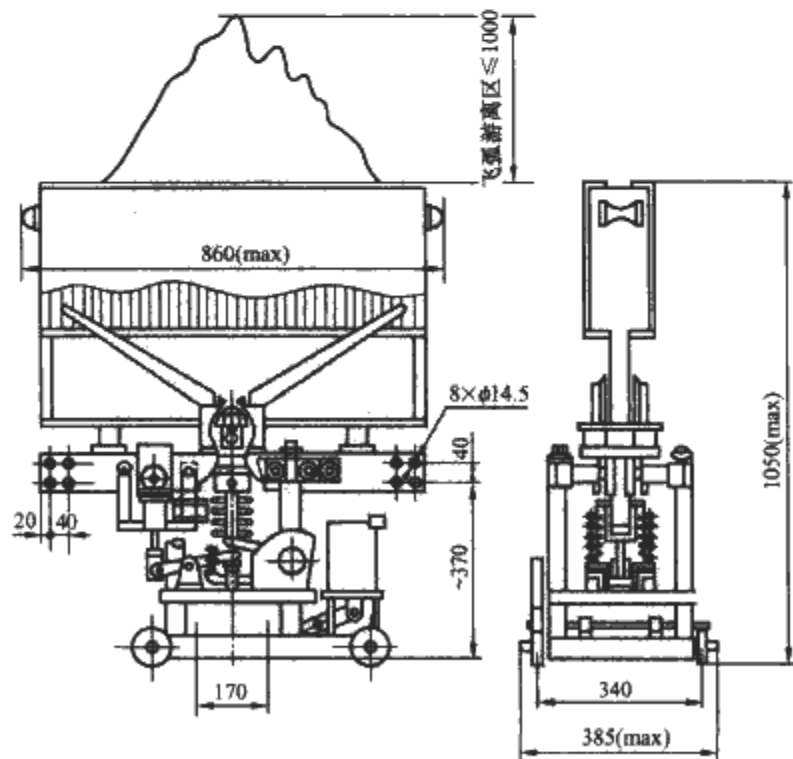


图 2.5-38 DS14-30/15 (63/15) 直流快速断路器外形及安装尺寸

3.2.3.4 DS16 直流快速断路器

DS16 系列额定电压可分为 800V 和 1500V 两挡, 为单极、无极性, 其显著特点是模块结构, 由触头导电回路、闭合保持装置、直接瞬时过电流脱扣装置, 灭弧罩及辅助触头盒等组成。其结构见图 2.5-39。

控制电源可为 DC 220V, 110V, 50V, 也可用 AC 220V 整流, 线圈额定闭合功率 1300W, 闭合脉冲时间 0.5~1s。线圈保持功率 2.5W。其技术数据见表 2.5-24。断路器的外形尺寸见图 2.5-40。为安全起见, 断路器主绝缘壁及对地最小间距应符合表 2.5-25 要求。

表 2.5-23 DS14 直流快速断路器的技术数据

项 目		DS14-10/08	DS14-20/08	DS14-30/15	DS14-63/15
额定电压(V)		1500		1500	1500
最高工作电压(V)		1600		1600	1600
额定电流(A)		1000	2000	3150	6300
整定电流范围(A)		800~2000	1600~4000	2500~6300	4800~12 600
分断能力(kA)		30		50	50
分断时过电压(试验电压)(kV)		≤3		<3	<3
全分断时间(ms)		30		30	30
限流系数		≤0.65	≤0.7	≤0.65	
机械寿命(次)		5000		5000	
电寿命(次)		500	400	100	50
触头开距(mm)	主触头	≥26		≥12.5	
	弧触头			≥10	
触头压力(N)	主触头	235.2±19.6		686±49	1568±98
	弧触头			117.6±29.4	117.6±29.4
弧触头超行程(mm)				3±0.5	
控制功率(瞬时)		$\frac{AC}{DC}$ 220V <50A		$\frac{AC}{DC}$ 220V <50A	
质量(kg)		101	111	169	201
闭合操作动作时间(ms)		≈30		≈30	
分励操作动作时间(ms)		≈110		≈110	
开关通低压额定电流时冷态电压降(mV)	进出线之间	100	130	60	90
	主触头之间	65	90	50	70
	弧触头之间			50	70

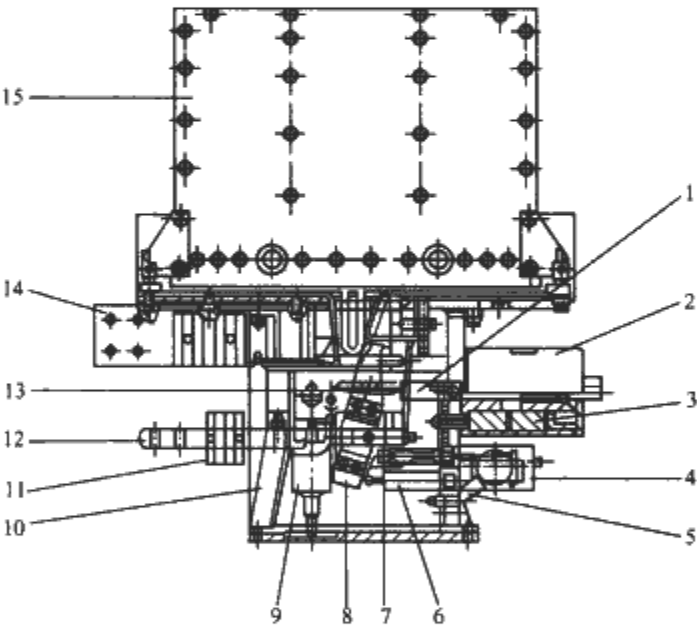


图 2.5-39 DS16 直流快速断路器的结构
1—叉杆；2—闭合保持装置；3—线圈；4—辅助触头盒；
5—接地装置；6—缓冲器；7—推杆；8—动触头；9—过
流脱扣装置；10—底座；11—散热器；12—下汇流排；
13—脱扣螺母；14—上汇流排；15—灭弧室

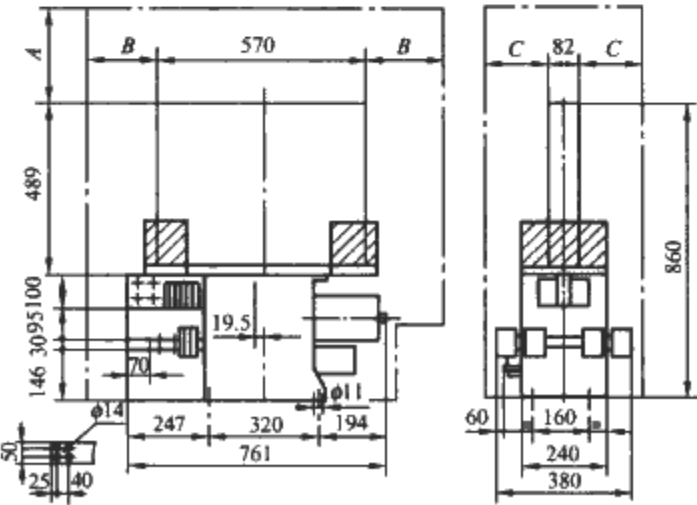


图 2.5-40 DS16 直流快速断路器的外形尺寸

表 2.5-24 DS16 直流快速断路器技术数据

项 目	技术 数 据	
额定电压 U_N (V)	1500	800
额定电流 I_N (A)	400	
最大工作电压(V)	1800	1000
额定绝缘电压(V)	4000	
额定极限分断能力(kA)	75($t=15ms$)	100($t=15ms$)
分断过电压	$(1.5\sim2)U_N$	
固有动作时间(ms)	4	
电流整定范围(kA)	2~5, 4~10 2~8, 4~15	
电寿命(次)	200	
机械寿命(次)	20 000	
操作电压(V)	DC220、110、50	
辅助触头数量	5NC+5NO	
辅助触头容量	AC 220V 10A；DC 110V 1A	
外形尺寸(mm)	761×380×860	
安装尺寸(mm)	4× ϕ 11, 320×160	
质量(kg)	110	98

表 2.5-25 断路器主绝缘壁及对地最小间距 mm

最小间距	A	B	C
绝缘壁	750	50	—
绝缘网	350	—	—
地	750	300	400

3.2.4 真空断路器

真空断路器尚处于启蒙阶段，系列产品不多，我国唯一的一个 DK5 系列还在推广之中。DK5 系列真空断路器目前只有少数几个企业生产，他们也有各自的型号，广州南洋电器有限公司的 NYDK1，宝鸡宝光设备有限公司的 SBG-DK1，成都旭光电子股份公司的 XGDK2，杭州之江开关公司的 HSV1，浙江佳利电气公司 JLW1，长征电器公司 MADK5 等。

DK5 真空断路器适用于额定电压 (V) 400，690，1140 的电路。在 1140V 电路中更可发挥其特点。它具有 1600A 和 3200A 两个壳架等级，其结构见图 2.5-41。

由图 2.5-41 可看出，DK5 具有智能控制器，使用微处理器控制和数字显示，可达到选择性保护。其技术参数见表 2.5-26。该断路器可同时装设欠电压脱扣器，分励脱扣器等。其外形尺寸见图 2.5-42 和图 2.5-43。

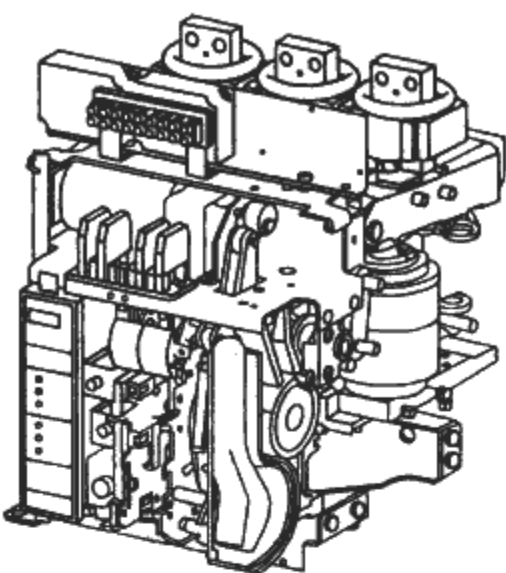


图 2.5-41 真空断路器的结构图

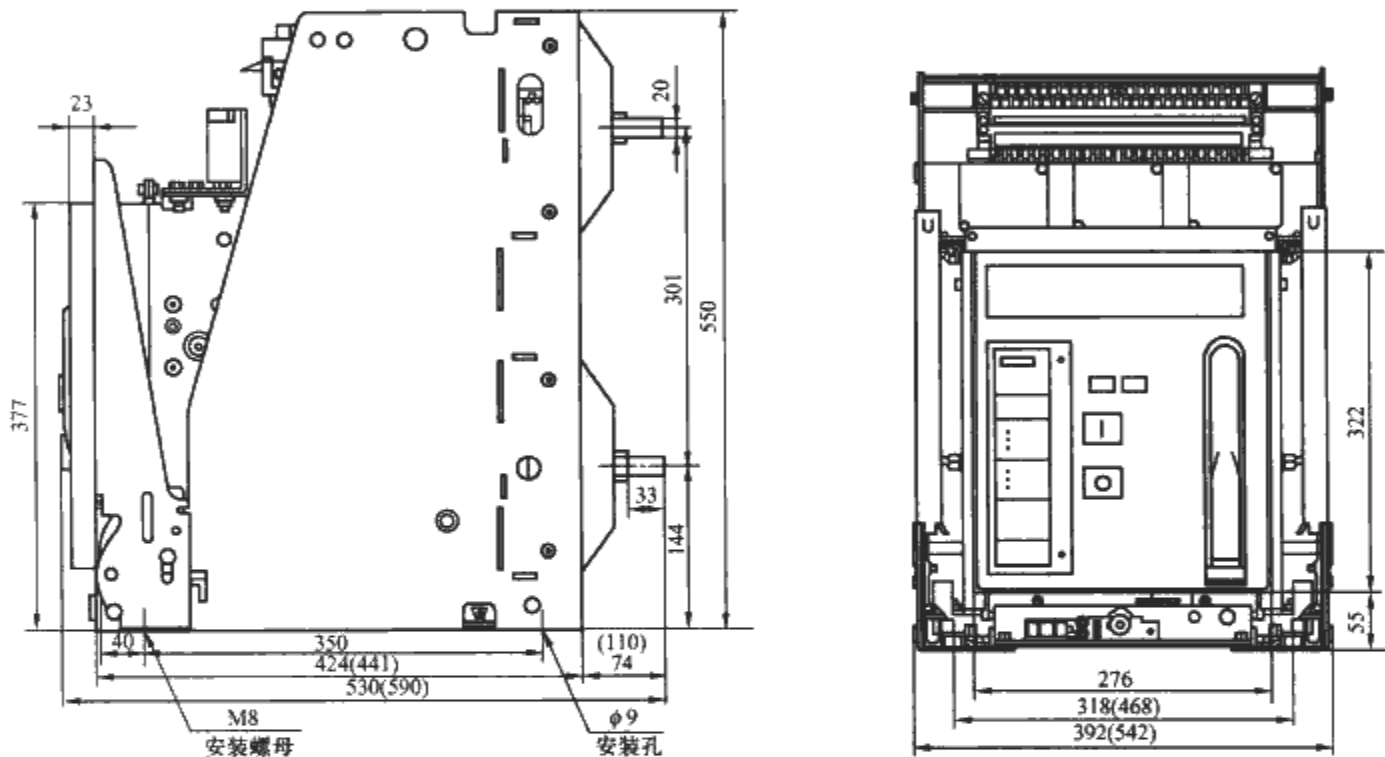


图 2.5-42 抽屜式 DK5 真空断路器的外形尺寸和安装尺寸 (括弧中为 3200A 尺寸)

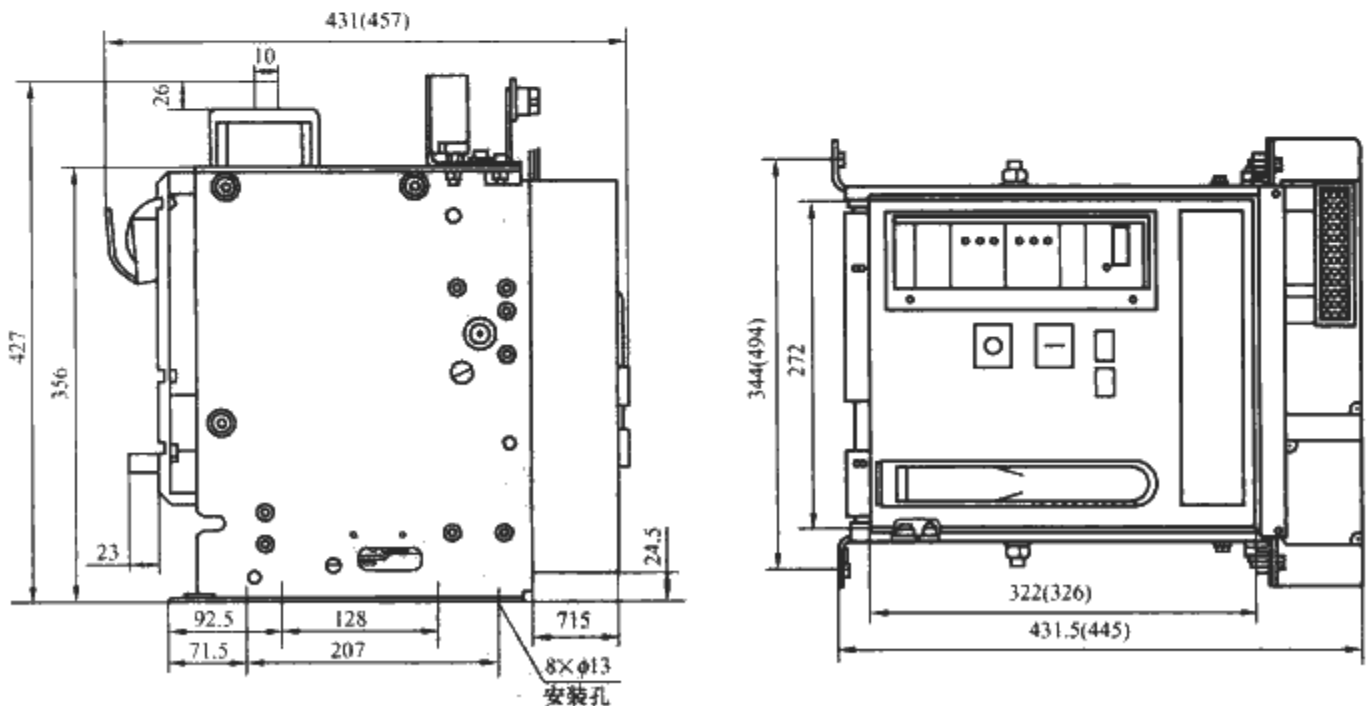


图 2.5-43 固定式真空断路器的外形尺寸和安装尺寸 (括弧中为 1600A 尺寸)

表 2.5-26 DK5 真空断路器的技术参数

项 目		技术参数	
壳架等级额定电流(A)		1600	3200
额定工作电流(A)		630, 800, 1000, 1250, 1600	1600, 2000, 2500, 3200
额定绝缘电压(A)		400, 690, 1140	
极数(P)		3, 4	
分断能力(400V)		I_{cs} 分断次数 16 次	
壳架等级额定电流(A)		1600	2500
额定运行短路分断能力 I_{cs} (kA)		65	65
额定极限短路分断能力 I_{cu} (kA)		65	80
额定短时耐受电流 (400A)		$I_{cw}(1s)=40kA$	
寿命 (次)	通电操作循环次数	1000	
	免维护操作循环总次数	10 000	
	维护操作循环总次数	30 000	
辅助触头约定发热电流 (A)		6	
辅助触头额定工作电压 (V)	AC	127, 220, 380	
	DC	110, 220	
辅助触头控制容量 (V)	AC	300VA (AC-15)	
	DC	60W (DC-13)	
欠电压脱扣器 U_N (V)	AC	220, 380	
	DC	220, 380	
分励脱扣器 U_e (V)	AC	220, 380	
	DC	110, 220	
合闸线圈 U_c (V)	AC	220, 380	
	DC	110, 220	
储能电动机 U_e (V)	AC	220, 380	
	DC	110, 220	

4 断路器设计要点

4.1 设计程序

断路器的一般设计程序如图 2.5-44 所示。设计断路器, 首先要根据技术任务书的要求确定结构选型, 然后逐步进行各部件零件的设计计算。目前尚不能单纯通过计算程序就得到正确的设计。断路器的设计是一门试验学科, 往往计算与试验要反复进行修改调整, 最终得到合理的设计。充分利用计算机模拟及仿真技术进行设计是现代设计的特点, 可大大提高设计速度和成功率。

断路器设计应充分注意到零部件的标准化、系列化、通用化以及结构工艺的合理性和经济性, 以利于机械化自动化大批量生产。

此外, 也可在典型产品的基础上, 利用相似原理, 对某些局部作些改进和提高, 最后通过试验验证的设计方法。

新设计的断路器在投入大批量生产之前, 都要严格进行样品试制和试验, 并通过小批量生产的考验, 以保证设计、工艺和工艺装备都符合产品技术经济指标的要求。

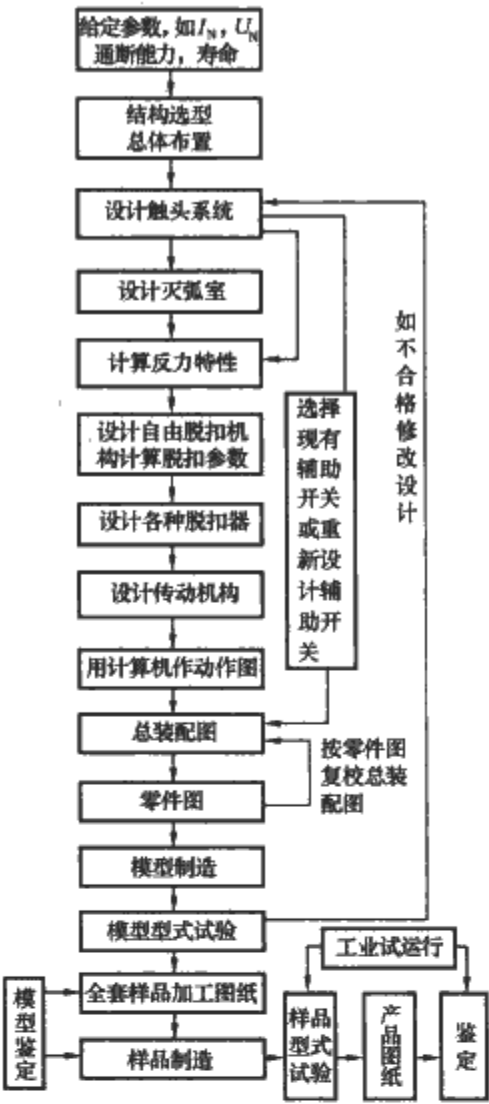


图 2.5-44 断路器的一般设计程序

4.2 结构选型

断路器设计首先应确定总体结构方案和它的布置方式。如果已确定是万能式或塑料外壳式, 那么进一步要考虑布置方式, 平面布置的优点是装配方便、便于检修, 但所占有安装面积较大。立体布置则反之, 能缩小断路器的安装面积。塑料外壳式断路器早期产品为平面布置, 但现代塑料外壳式断路器也趋向立体布置, 在不开盖情况下可以加装附件、辅助开关(如欠电压、分励脱扣器)、电动机操动结构等。新型万能式断路器多采用“田川分隔”来布置断路器各部件。“田川分隔”是指: 断路器的侧视图是“田”字形分隔; 正面按“川”字形分隔, 其分隔原理见图 2.5-12。这样可把断路器外形设计成规则立方体, 空间利用率高, 外形整齐美观。同时要考虑断路器本体和抽屉座配合的要求。

4.3 触头系统设计要点

4.3.1 触头系统的基本要求

触头系统是断路器的执行元件, 必须满足三个基本要求:

- (1) 长期工作制的载流能力。即触头系统长期通过额定电流不致有过高的发热, 其温升不应超过标准的规定。
- (2) 安全可靠地接通和分断极限短路电流及其以下的所有电流。对于直流断路器要注意能否分断临界电流。
- (3) 达到标准规定的操作性能能力。在规定的操作循环次数内, 触头不致严重磨损。在经 I_{cs} 试验后, 触头仍可分断规定次数的额定电流, 并经温升试验合格。

4.3.2 触头的型式

断路器的触头常用的三种型式: 对接式、桥式和插入式。

对接式触头应用最广，多为面接触或线接触。为了提高接触性能，在接触处都焊有银或银基合金镶块，保证能长期通过额定电流。桥式触头应用也很多，辅助开关中应用面广。

在主电路中应用桥式触头，因有两个断开，可提高分断能力或简化灭弧室结构，也省去笨重的软连接，提高动触头的灵活性。在直流断路器中，两个触头置于两个灭弧室中。插入式触头常用作板后出线的插入式连接、或隔离触头的连接，其特点是在通过大短路电流时有电动力补偿作用，能有效地防止触头弹开。在有电弧烧灼的地方不宜采用插入式，因触头被烧灼后摩擦力大为增加，造成下一次闭合非常困难。

对接式触头有单挡、双挡之分。三挡触头结构复杂，而且使电流转移过程困难，不利于分断短路电流，现已不用。双挡触头有主触头和弧触头之分，由主触头承载电流，弧触头分断短路电流。在薄片并联的触头系统中，中间的二、三片触头凸起一点距离（例如1mm），使其在闭合时先接触，分断时后分断，也形成双挡触头，提高了断路器承载长期电流的能力。单挡触头只有一个触头，就是主触头，也作分断电弧之用。在设计合理情况下，应用单挡触头结构简单，经济。但对触头材料有较高的要求。

4.3.3 触头系统的主要参数

(1) 触头开距。主要决定于工作电压、分断临界电流（特别是直流）和触头可能的反弹距离。弧触头（对单挡就是主触头）开距约在15~70mm之间。如果断路器有防止反弹的装置或有保持触头在断开位置的锁扣装置，触头开距可以选择得小些。

(2) 触头压力。主要决定于极限短路分断能力和短时耐受电流。必须保证主触头在通过短路电流时不致因电动力斥开产生跳动而熔焊。但是限流式断路器的触头压力越小越好，以满足触头长期导电能力和避开电动机最大起动电流的要求为限。

(3) 触头超程（重要的是主触头的超程）：主要由传动连杆的磨损和触头的磨损决定。要使断路器在操作性能能力试验终了和在 I_{cs} 试验后仍能可靠地接触，保持必需的触头压力，一般要保持2~6mm之内。

(4) 触头材料。确切地说指触头镶块的材料。对主触头要求有长期导电能力，常采用银或银基合金材料作主触头。弧触头要求能耐电弧、耐磨、抗熔焊，多采用含石墨的银基合金。对只有主触头的单挡触头则要兼有主、弧触头二者的性能，目前正在不断研制这种镶块材料。

真空断路器的触头多为对接平面触头，要求高分断能力、高抗熔焊性、高电导率、高热导率，低磨损、低截流值。目前采用CuTeSeFe合金和CuCr合金居多。

4.3.4 载流体和软连接

其截面选择必须保证它们在长期工作时不超过温升的规定。现代断路器标准规定在通断试验后长期通过额定电流时，其接线端的温升应不超过80K。载流体的经济电流密度选用在1~3A/mm²，视断路器额定电流大小而定，额定电流大的断路器选用较小的电流密度。软连接的经济电流密度在2~3.5A/mm²。

在单断点触头系统中，必须有软连接，但它往往限制了 I_{cw} 的提高（受几何尺寸的限制）。在双断点触头系统中则可省去软连接，从而可提高 I_{cw} 值。但双断点触头要多用触头镶块材料，要两个灭弧室。因此，在设计中要从综合技术经济指标来衡量，决定采用哪一种触头系统。

4.3.5 电动力补偿

短路电流通过触头系统会产生巨大的电动力。限流式断路器利用此力使触头系统迅速斥开达到限流断开的目的。而对选择型断路器，则利用此力进行电动力补偿以保证必要的触头压力。电动力补偿有斥力补偿和吸力补偿两种。图2.5-45为具有斥力补偿的触头系统。在断路器闭合时轴O保持不动，当出现短路电流时，在平行导体之间所产生的斥力 F_c 将有使平行导体绕轴O反时针方向转动的趋势，增大了触头压力。保持触头有效接触。图2.5-46为具有吸力补偿的触头系统，当短路电流通过触头系统时，同方向流过主触头的短路电流所产生的吸力使触头压力增加。

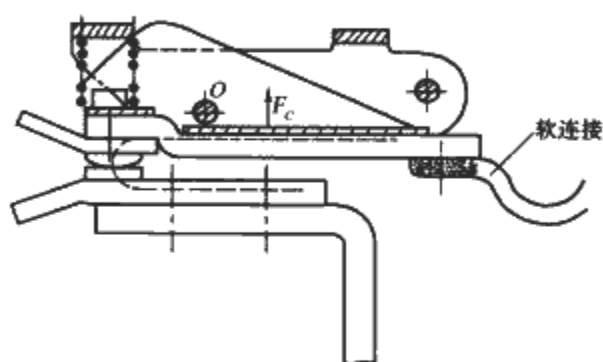


图 2.5-45 斥力补偿的触头系统

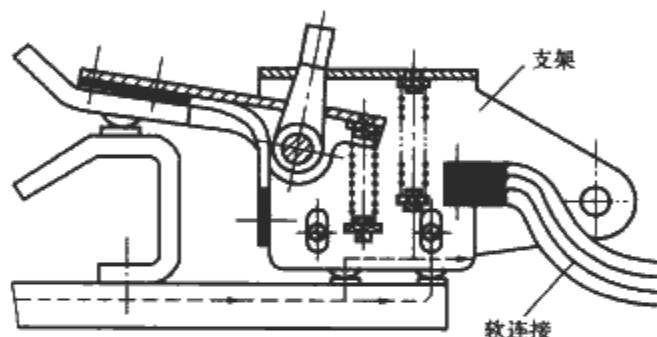


图 2.5-46 吸力补偿的触头系统

利用合理布置电流途径也可达到电动力补偿的目的。在双断点桥式触头结构中应电流途径设计成C形回路，如图2.5-47(a)所示，在触头闭合时，动触头桥被机构锁住，可视为固定不动，这时短路电流在回路中所产生的电磁力是使动触头压向动触头的方向，起到电动力补偿作用。

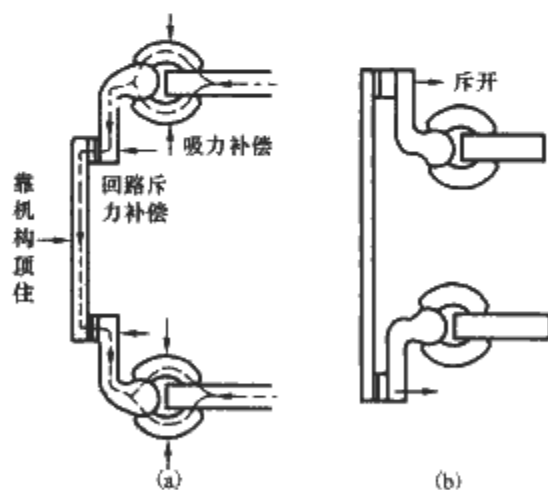


图 2.5-47 C形补偿回路

(a) 正确；(b) 不正确

注意不能把电流回路布置成如图2.5-47(b)所示回路，这时电动力将促使静触头斥开，起不到电动力补偿作用。

多片触头并联，也能降低电动斥力，起到电动力补偿作用。如果由几个触头片并联，则总的电动斥力理论上降到原来的1/n。但触头并联数不宜太多，否则使结构复杂，不利于制造和装配。一般控制每个触头片的额定电流在250~500A之间。

4.4 灭弧室设计要点

4.4.1 灭弧室的设计要求

- (1) 可靠地熄灭电弧，燃弧时间应尽可能短。
- (2) 有足够的热容量，使在熄灭电弧时，灭弧室的温度不致太高，防止灭弧室变形或碎裂。因此，在采用栅片灭弧时，片数往往不是接近极压降来选择，而是按尽可能增大热容量来确定。
- (3) 尽可能小的飞弧距离。有时为了降低飞弧距离，在栅片上部增设灭焰栅片，灭焰栅片材料可用金属也可用绝缘材料。
- (4) 当受电弧高温作用时，灭弧室能产生有利于灭弧的气体，如钢纸板材料就有这种特点。

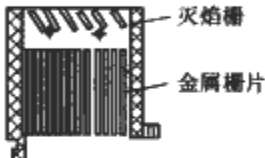
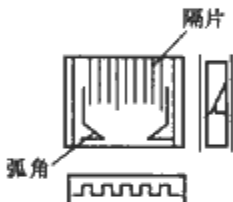
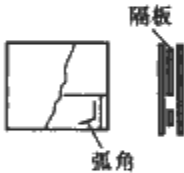
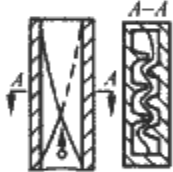

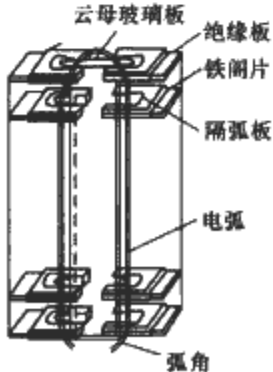
- (5) 灭弧室的室壁应尽可能平整，既便于电弧运动，也有利用电弧与室壁接触而受到冷却，增强灭弧性能。
- (6) 有良好的绝缘性能，在受电弧高温作用后不容易碳化。
- (7) 有足够的机械强度，能承受电弧热能产生的压力，另一方面也可承受产品在装配和运输过程中的振动，而不致碎裂。

塑料外壳式断路器多采用栅片灭弧。严格地说，其灭弧室仅是本体一部分，而塑料外壳才是灭弧室的室壁，由它来承受电弧热能所产生的压力和吸收电弧的热能。

4.4.2 常用灭弧结构

断路器和快速断路器常用的几种灭弧室见表 2.5-27。真空断路器中，灭弧室与触头合成为一个真空泡。

表 2.5-27 几种常用的灭弧室

结 构 图	作用原理和结构说明	优 缺 点	适用范围
	<ul style="list-style-type: none">1. 去离子栅灭弧2. 栅片可平行布置，也可辐射状布置3. 灭焰栅可用金属材料，也可用绝缘材料4. 室壁材料可用石棉水泥或耐弧塑料等	<ul style="list-style-type: none">1. 交流灭弧性能好2. 飞弧距离较小3. 制造较复杂	交流断路器或交直流通用的断路器
	<ul style="list-style-type: none">1. 长弧灭弧原理2. 隔片用绝缘原材料3. 室壁材料可用石棉水泥板或玻璃丝板	<ul style="list-style-type: none">1. 适于熄灭直流电弧2. 外形尺寸较小3. 制造较复杂	直流快速断路器
	<ul style="list-style-type: none">1. 长弧灭弧原理2. 纵向隔板把灭弧室分为 1~4 个窄缝3. 隔板用石棉水泥制成	<ul style="list-style-type: none">1. 适用于熄灭直流电弧2. 结构简单，制造方便3. 外形尺寸大4. 需加辅助磁吹	直流快速断路器
	<ul style="list-style-type: none">1. 长弧灭弧原理2. 用石棉水泥制成3. 为了进一步拉长电弧，灭弧室内壁成犬牙交错状	<ul style="list-style-type: none">1. 适于熄灭直流电弧2. 飞弧距离较小3. 节省金属材料4. 装配简单5. 需加磁吹	直流断路器或交直流通用的断路器
	<ul style="list-style-type: none">1. 长弧和短弧相结合的灭弧原理2. 绝缘隔片用耐弧水泥制造3. 室壁用玻璃丝板4. 内设小弧角把电弧拉成螺旋状	<ul style="list-style-type: none">1. 适于熄灭直流电弧2. 外形尺寸较小3. 制造较复杂4. 需加磁吹	直流快速断路器
	<ul style="list-style-type: none">1. 长弧和短弧相结合的灭弧原理2. 有多层灭弧片叠成，在层间电弧暴露在空气中，有利散热3. 每层灭弧片由绝缘板、铁栅片（上、下各一）、隔弧板及云母玻璃板组成	<ul style="list-style-type: none">1. 适于熄灭直流电弧2. 外形尺寸较小3. 制造较复杂4. 需加磁吹	直流快速断路器

4.5 过电流脱扣器

过电流脱扣器有许多类型,其主要类型见表 2.5-28。

表 2.5-28 过电流脱扣器类型一览表

脱扣器类型		结构特征		延时特性	主要优缺点
热式	双金属片式	利用双金属片延时		长延时, 反时限	1. 结构简单, 成本低 2. 返回系数较高 3. 整定电流和延时受温度影响较大 4. 双金属片式热稳定差 5. 动作后复位时间长
	热继电器式	电流互感器与热继电器组合达到延时			
电磁式	电磁铁式		铁心、线圈	瞬 时	1. 机构简单, 成本低 2. 返回系数低 3. 只能瞬时动作, 宜作短路保护之用
	钟表式		电磁、擒纵机构延时	长延时, 反时限或定时限 短延时, 定时限 瞬时	1. 延时准确, 误差小于 10% 2. 调整方便 3. 不受温度影响 4. 成本较高
	空气阻尼式		空气室延时	长延时, 反时限 短延时, 定时限 瞬时	1. 延时准确, 误差±10% 2. 调整方便 3. 受温度影响较小 4. 成本较低 5. 容易老化, 可靠性差
	液压式	活塞式	利用活塞在盛硅油的油杯中运动达到延时	长延时, 反时限, 瞬时	1. 动作电流整定值较准确 2. 延时误差大 3. 密封困难, 结构复杂
		浮动铁心式	利用铁心在盛硅油的油杯中浮动达到延时	长延时, 反时限, 瞬时	1. 动作电流整定值较准确 2. 延时误差大 3. 结构简单, 密封较活塞式容易
电磁感应斥力式		利用电容对线圈放电在铝盘中感应涡流产生斥力		与半导体元件配合达到延时	1. 体积小, 结构简单, 动作速度快 2. 不需要铁心, 制造方便 3. 需外加电容器(高压)和充电电源
电子式		半导体元件组成延时电路		长延时, 反时限 短延时, 定时限或反时限 瞬时	1. 延时准确, 误差可达 5% 2. 调节方便 3. 可实现多种保护 4. 返回系数高 5. 维修水平要求较高
智能型		利用微处理达到各种特性		长延时, 反时限 短延时, 定时限或反时限 瞬时	1. 延时准确, 误差可达 1% 2. 调节方便 3. 可实现多种保护功能 4. 可通信

现代断路器中应用最广的是热磁式脱扣器（热式+电磁式）和智能型脱扣器。额定电流较小的断路器，特别是小容量的塑料外壳式断路器多采用热磁式脱扣器。大容量的断路器则多采用智能型脱扣器。电磁感应斥力式脱扣器用于直流快速断路器中。

4.5.1 热脱扣器

热双金属片式脱扣器的工作原理是电流的热效应。当过载电流通过双金属片时，双金属片发热而弯曲，推动断路器的脱扣轴而发生脱扣。电流较大，动作时间越短，适合于制成反时限脱扣器。其保护特性较接近于被保护装置的过载特性，电动机保护用的断路器多选用这种脱扣器。

双金属的加热方式有三种：直接加热、间接加热和复合加热，见图 2.5-48 (a) ~ 图 2.5-48 (c)。

直接加热是以电流直接通过双金属片中，使双金属片发热。一般适用于 6~100A 的电流范围。

间接加热中是将双金属置于加热元件上，过载电流只通

过加热元件，发热元件的热量通过热传导传递给双金属片。最方便的发热元件就是断路器载流体本身，在装置双金属片部位减小其载流截面，使其有适当的发热量。

复式加热是将双金属片同热元件串联，热元件即除双金属片加热，小型断路器（6A 以下）多采用这种加热方式。

图 2.5-48 (d) 为互感器加热, 是将互感器的二次电流直接加热双金属片, 是直流加热的一个特例, 适用于大容量断路器。

一端固定的长条矩形双金属片产生的推力公式为

$$F = \frac{KEb\delta^2}{4\lambda}\tau$$

当均匀加热到 τ 度时, 双金属片自由端的挠度公式为

$$S = K \frac{\lambda^2 \tau}{\delta} \quad (\text{mm})$$

$$\tau = Q - Q_c$$

上两式中: δ 为双金属片厚度, mm; b 为双金属片的宽

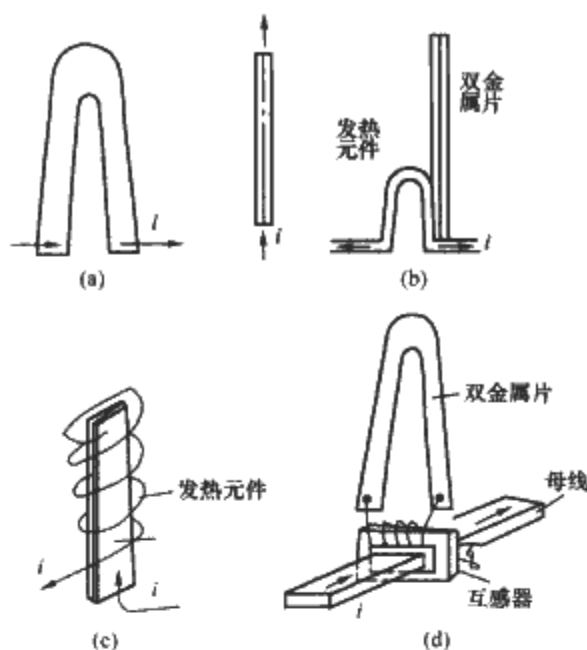


图 2.5-48 双金属片加热方式
(a) 直接加热; (b) 间接加热;
(c) 复合加热; (d) 互感器加热

度, mm; τ 为 $Q - Q_c$ 足够使脱扣器动作的双金属片最高温升, $^{\circ}\text{C}$; Q 为双金属片工作温度, $^{\circ}\text{C}$; Q_c 为室温, $^{\circ}\text{C}$; E 为弹性模数, N/mm^2 ; K 为比弯曲。

E 、 K 为双金属片材料的固有特性参数, 可从双金属片材料性能中查到。

双金属片的厚度和宽度 b 决定双金属片的推动力, 双金属的厚度越厚, 宽度大推动力就大。但厚度大, 其挠度就小, 也就是脱扣行程越小。要有足够的挠度就要与足够的双金属片长度 l 。这几个参数是互相制约的, 还和具体结构有关。如果三相双金属片共同作用到公共的脱扣轴上, 则双金属片所产生的推力 F 需比机构脱扣的力大 (6~10) 倍。以缩小在过载临界电流时一个和三个双金属片的动作误差。

对直接加热的双金属片设计时要考虑双金属片会受到短路电流的冲击, 如果其截面太小, 将会在大短路电流通过时被烧掉。因此双金属片常和电磁式脱扣器串联, 组成热磁式脱扣器, 过载电流时, 双金属片动作, 在短路电流通过时, 由电磁脱扣器瞬时动作, 既保护双金属片, 也保护了电路和电气设备。

热双金属片脱扣器易受环境温度的影响, 使动作整定值产生误差。为了弥补此误差, 可采用温度补偿措施。图 2.5-49 所示是一种最简单的温度补偿原理图。只要脱扣指采用和热脱扣器同样的双金属片材料制造, 取同样的几何尺寸, 就可实现全补偿。当环境温度变化时, 两片双金属片挠度完全相同, 所以双金属片自由端与脱扣指作用点之间的距离保持相对不变, 这就是起到了温度补偿作用。

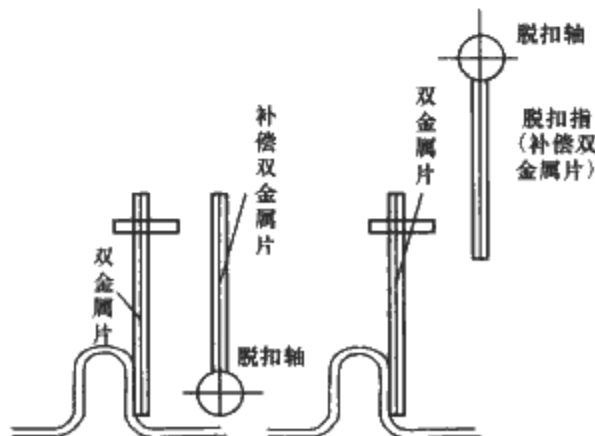


图 2.5-49 双金属片式脱扣器的环境温度补偿

4.5.2 热继电器式脱扣器

利用电流互感器与现有热继电器组会达到过载保护特性。图 2.5-50 所示为一种热继电器式脱扣器。设计这种脱扣器只要选择一种适合的热继电器 (选用 5A 或 6.3A 的热继电器较为合适), 但最好要有温度补偿性能。再设计一个电流互感器与之配合。改变互感器二次匝数, 可达到不同的额定电流。

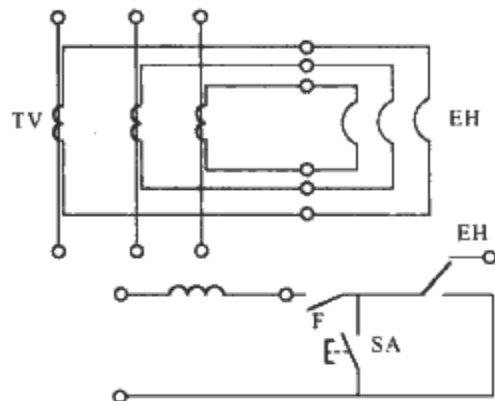


图 2.5-50 热继电器式脱扣器

设计电流互感器需确定互感器匝数、铁心截面、二次导线线径等三个主要参数。

电流互感器的磁通势方程为

$$I_1 n_2 = I_2 n_1 + I_0 n_1$$

式中: $I_0 n_1$ 为励磁安匝。

因 $I_0 n_1$ 值很小, 可忽略不计, 则有

$$n_2 = \frac{I_1}{I_2} n_1$$

式中: n_1 为一次绕组匝数, 一般为 1~5 匝。

对直穿型互感器, $n_1 = 1$, 则二次绕组匝数

$$n_2 = \frac{I_1}{I_2}$$

式中: I_1 为一次电流, 即主电路电流, A; I_2 为二次电流, A。

互感器铁心有效截面积为

$$S_p' = \frac{E_c}{4.445 n B_F} \times 10^8 \quad (\text{cm}^2)$$

铁心的标称截面积

$$S_p = S_p' / K_d \quad (\text{cm}^2)$$

式中: f 为频率; K_d 为铁心叠片填充系数, 可取 0.9~0.95; B_F 为铁心中磁通密度, 决定于硅钢片厚度和牌号, 对 0.5mm, D31 热轧硅钢片可取 $B_F = 0.8\text{T}$ 。

二次绕组感应电动势为

$$E_2 = I_2 [(R_2 + R_1) + j(X_2 + X_1)] \quad (\text{V})$$

式中: R_2 为二次绕组电阻, Ω ; R_1 为负载电阻, Ω ; X_2 为二次电抗, Ω ; X_1 为负载电抗, Ω 。

在近似计算中, 可忽略 $j(X_2 + X_1)$ 项, 则

$$E_2 = I_2 (R_2 + R_1)$$

式中: R_1 为热继电器 (或双金属片) 和连接导线电阻之和; R_2 在导线直径和线圈尺寸确定后可计算出。

二次绕组导线截面

$$A_2 = \frac{I_2}{j_2} \quad (\text{mm}^2)$$

式中: j_2 为二次绕组电流密度, 对于铜导线 $j_2 = 2 \sim 5\text{A/mm}^2$ 。如果确定二次电流为 5A, 则导线截面可求出。

互感器初步设计完成后，最终需通过试验修正设计参数。

由于热继电器脱扣器是借助于热继电器的触头去接通断路器的分励线圈而使断路器断开，要求用户配备可靠的分励电源。

4.5.3 电磁感应斥力式脱扣器

这种脱扣器的特点是动作速度快，可在1ms内使机构动作，适用于直流快速断路器。这种脱扣器的结构非常简单，由一个扁线圈和一个铝盘（或铝环）构成，如图2.5-51所示，但控制放电回路却较为复杂。

控制放电回路需要辅助电源断相保护，高压充放电触发回路。当过电流信号电压达到晶体管峰点电压时，晶体管导通，使已充电的高压电容器向电动斥力脱扣线圈放电，这时在铝环中感应出涡流，它与脉冲电流产生的电动斥力，使短路环撞击保持机构中的脱扣板，保持机构释放，使断路器断开。

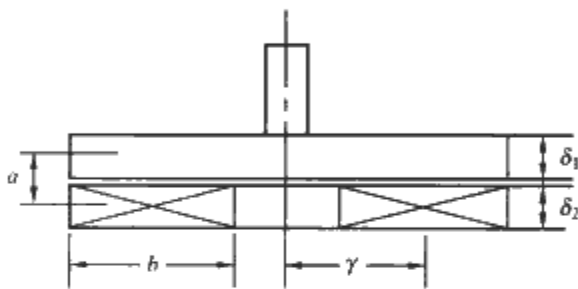


图 2.5-51 电磁感应斥力式脱扣器原理图

放电电流与储能电容的电容量和电压有关，电压越高，放电电流越大，得到的斥力也越大，但是电压太高对工作可靠性不利。对辅助电源和可靠性要求高，一般要求有辅助回路的欠电压或失电压保护措施，因而限制了这种脱扣器的应用。

4.5.4 智能型控制器

智能控制器分为保护用智能控制器和通信智能控制器两种。

4.5.4.1 保护用智能控制器

保护用智能控制器简称智能控制器或控制器，是断路器的核心部件，其基本功能是满足断路器的过电流短路保护，对断路器的负载电流进行测量、监控，对故障电流进行分析及发出对故障电流的处理信号。其扩展功能能满足各种电量的测量及通信等功能。典型的产品就是上海磊跃自动化公司的ST3智能控制器。该公司为我国同行业定点生产企业，本节将以其为基础，论述智能控制器的设计要求。该产品是专用于断路器配套，故其外形尺寸、脱扣打击点、安装尺寸等处必须满足断路器本体的要求。智能控制器的功能见表2.5-29，这种控制器可达到各种保护特性，见表2.5-30。智能控制器有电源、信号采集、微机控制、信号输出、人机界面等部件组成，其原理框图见图2.5-52。

表 2.5-29 智能控制器功能	
基本功能	过载，短延时，瞬时保护
扩展功能	电压、电流、频率、功率、功率因数、电能、需用值、谐波、电压不平衡率测量，相序检测，过电压、欠电压、过频、欠频相序、逆功率、需用值、电压不平衡保护，接地漏电保护
附加功能	故障记录、历史记录、波形记录、触头当量记录、通信区域连锁

过载保护特性可以有多种选择，满足不同的保护对象的要求。

4.5.4.1.1 控制器电源

智能控制器的电源的保护功能电路应与线路电压无关，其扩展功能部分及附加功能部分可通过线路提供电源。控制器的电路部分主要是对保护功能而设计，其控制器电源如图2.5-53所示。控制器电源通过主回路电流及速饱和变压器产生电源。当电流大于规定值（包括在极限短路电流时），应提供控制器的正常工作电源，从图2.5-53中可看出有检测工作电压的线路，当电压超过一定范围时，通过T1场效应管短接电路以保证工作电源的稳定。

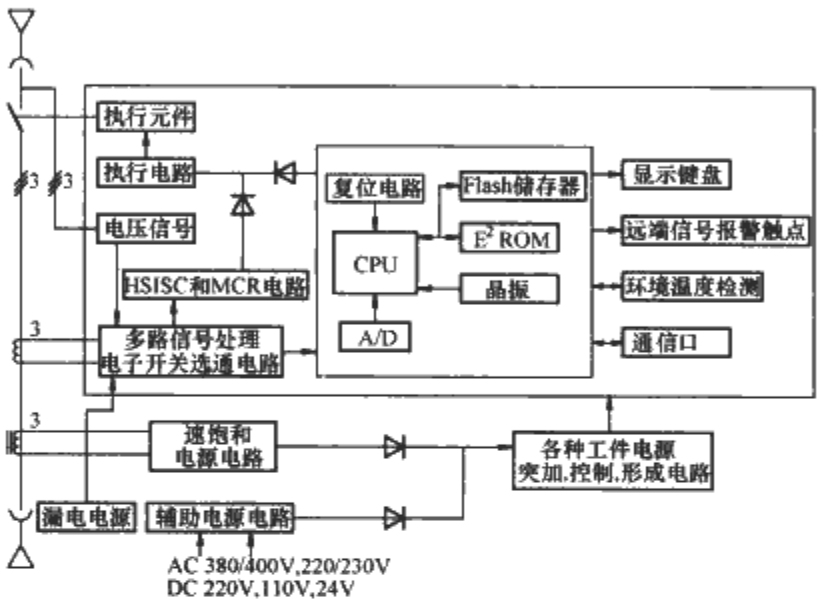


图 2.5-52 智能控制器原理框图

速饱和互感器设计条件：

(1) 速饱和互感器是工作在断路器的微观环境温度下，同时考虑在故障条件下产生的温度，速饱和互感器的工作环境温度温度为

$$T = T_a + T_b + T_l = 150^{\circ}\text{C}$$

式中： T_a 为断路器工作环境温度， 55°C ； T_b 为断路器母排温升， 70K ； T_l 为在故障电流时产生的温升， 25K 。

上述的温度是极限情况，如额定电流较小的断路器，可以取较小的数值。速饱和互感器绝缘材料的耐热等级根据散热的环境温度和速饱和互感器的温升选取。

(2) 控制器所需功率 U_d 、 I_d 。当滤波电容足够大时， U_d 的电压认为是直流电压。互感器感应出来的电压为梯形波，励磁电流为锯齿波。

(3) 速饱和互感器安装在断路器上的极限尺寸。速饱和互感器须根据所规定的极限的尺寸进行设计，结构如图2.5-54所示。

(4) 控制器起始工作的一次电流 $I = KI_{rl}$ （单相） K 取 $0.2 \sim 0.5$ 。

4.5.4.1.2 控制电源的保护

当一次电流超过控制器启动工作电流 KI_{rl} 时，直至极限分断电流时，互感器在电流过载状态下，致使 U_d 升高，控制器电源图2.5-53中设有电压自动调整回路，使过载电流泄放，保证 U_d 稳定。当大的故障电流突然发生时，互感器会产生很高的电压，所以互感器二次绕组端并有快速稳压管或压敏电阻吸收过电压。

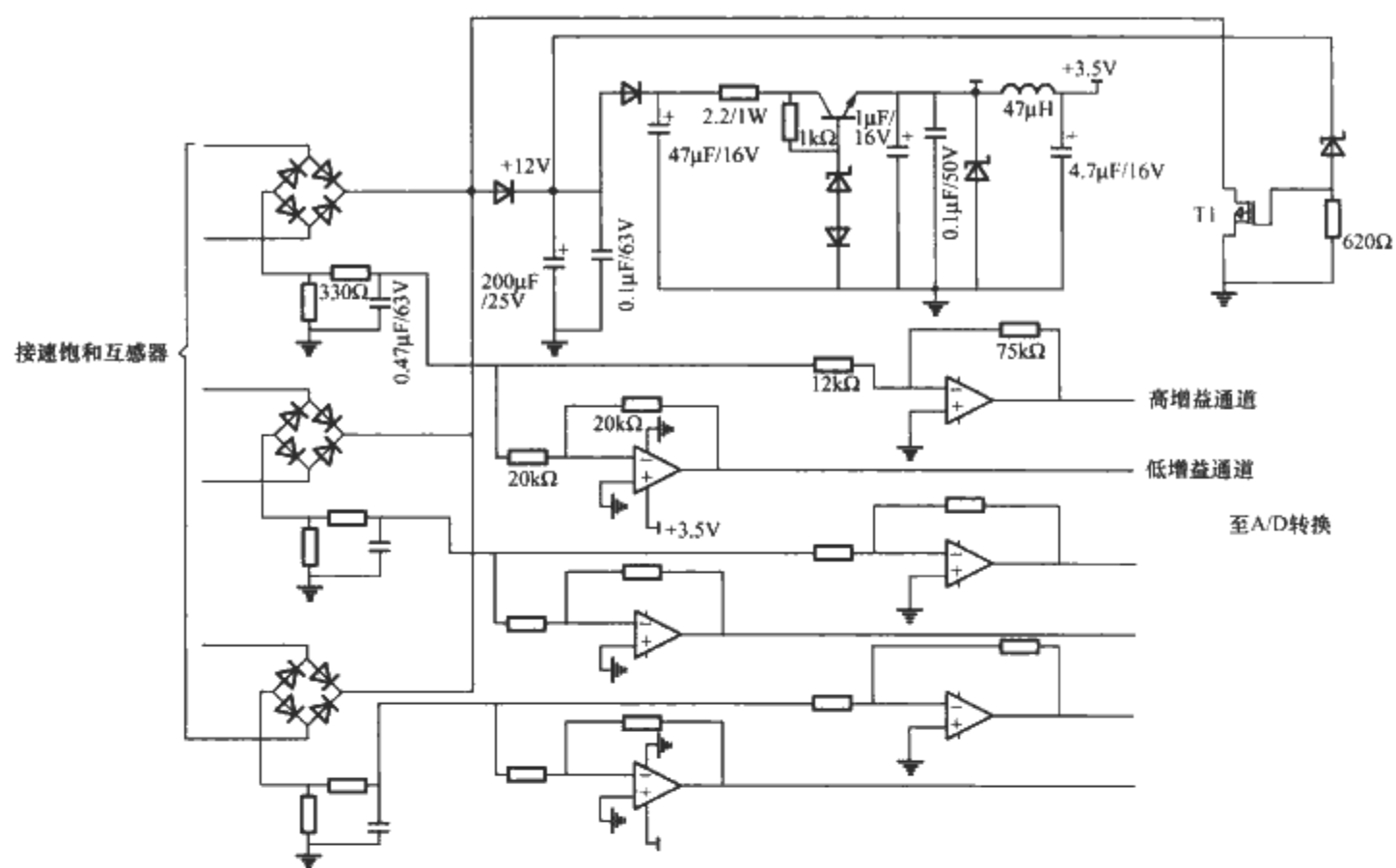


图 2.5-53 控制器电源原理图

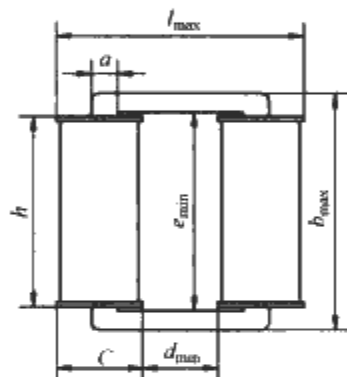


图 2.5-54 互感器结构

注：外形 l_{max} 、 b_{max} 结构允许的极限尺寸；
内腔 e_{min} 、 d_{min} 铜排允许的极限尺寸。

表 2.5-30 过载保护特性

发电机 保护用	动作 特性	$0.95I_{rl} > 2h$ 不动作 $1.05I_{rl} < 1h$ 动作
	整定范围： $I_{rl} = K_r I_N$ ($0.4 \sim 1.25$) 过载长延时特性： $T = (1.2I_{rl})^2 t_L / I^2$	
配电和 电机 保护	动作 特性	$1.05I_{rl} > 2h$ 不动作 $1.20I_{rl} < 1h$ 动作
	整定范围： $I_{rl} = K I_N$ ($0.4 \sim 1$) 过载长延时特性：基本 $T = (1.5I_{rl})^2 t_L / I^2$ 可扩展(1) 标准反时限 $T = K_2 / (N^{0.02} - 1)$ (2) 快速反时限 $T = K_2 / (N - 1)$ (3) 特快反时限（一般用途） $T = K_2 / (N^2 - 1)$ (4) 特快反时限（电动机保护） $T = K_2 / 1.15 \log_e [N^2 / (N^2 - 1.15)]$ (5) 高压熔丝兼容 $T = K_2 / (N^4 - 1)$	

注 I_{rl} —整定电流； t_L —整定时间； I —实际通电电流； K_2 符合标准 IEC 255-16； $N = I / I_{rl}$ 。

外接辅助电源与互感器产生的电源以“或”的形式连接，以保证控制器的其他功能正常运行。

4.5.4.1.3 信号采集

通过互感器采集一次电流，由于断路器的工作电流和故障电流的范围很大，所以信号采集要考虑很大的动态范围。

塑壳断路器的结构体积小，仅能由电源互感器产生信号，其线性动态范围为 $(1 \sim 3)I_{rl}$ 。超过线性范围，在 $(3 \sim 12)I_{rl}$ 范围时，由软件来补偿。当大于 $12I_{rl}$ 时，电流值不作检测，仅发出脱扣信号。

信号检测采用罗戈夫斯基线圈，罗戈夫斯基线圈具有正比于电流导数的输出，其动态线性范围大，特别适用万能式断路器的信号检测，图 2.5-55 为罗戈夫斯基空心线圈的工作原理图。

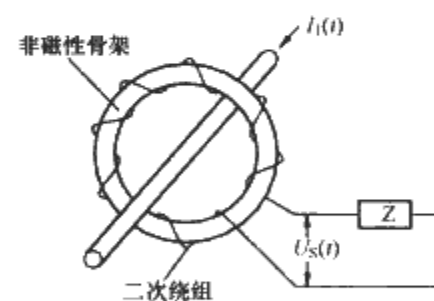


图 2.5-55 罗戈夫斯基空心线圈的工作原理

$$I_2 = I_d / 0.9 \quad I_1 = NI_2$$

对于圆环空心线圈。任意形状截面线圈的近似公式为

$$e(t) \approx \mu_0 NA [dI_1(t)/dt]$$

矩形截面线圈公式为

$$e(t) \approx \mu_0 N_w h / 2\pi \ln[(r_o/r_i) dI_1(t)/dt]$$

式中： μ_0 为真空磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ V} \cdot \text{S} / (\text{A} \cdot \text{m})$ ； N 为匝密度，匝/m； A 为单匝截面积， m^2 ； $2r_o$ 为外径，m； $2r_i$ 为内径，m； h 为高度，m； N_w 为空心环的匝数； $e(t)$ 为低负荷 $R_b \rightarrow \infty$ 时空心线圈的输出电压。

对于含有谐波分量的电流测量

$$I_1 = I_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1) + I_{m3} \sin(3\omega t + \varphi_3) + I_{m5} \sin(5\omega t + \varphi_5) + I_{m7} \sin(7\omega t + \varphi_7) + \dots$$

$$U_s = K dI_1/dt$$

式中： U_s 为罗戈夫斯基线圈输出感应电动势； K 为罗戈夫斯基线圈常数，与线圈结构有关。

$$U_S = K\omega I_{m1} \cos(\omega t + \varphi_1) + 3K\omega I_{m3} \cos(3\omega t + \varphi_3) + 5K\omega I_{m5} \cos(5\omega t + \varphi_5) + 7K\omega I_{m7} \cos(7\omega t + \varphi_7) + \dots$$

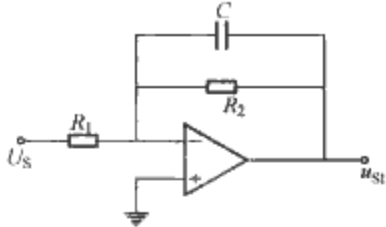


图 2.5-56 积分电路

从上式可以得出， U_S 得出的信号不能完全反映 I_1 电流，当谐波电流较小时，可以认为 U_S 与 I_1 成正比，考虑谐波影响时， U_S 经过积分电路还原 I_1 的波形，积分电路如图 2.5-56 所示。

$$U_S/R_1 = -(U_{S1}/R_2 + C U_{S1}/dt)$$

如罗戈夫斯基线圈感应出 I_1 的微分信号的谐波分量

$$U_S = nK\omega I_{mn} \cos(n\omega t), n \text{ 为谐波次数}$$

$$U_{S1} = -nK\omega I_{mn} \cos(n\omega t - \varphi_n) / [(R_1/R_2)^2 + (n\omega C R_1)^2]^{0.5}$$

$$\varphi_n = \arctan(n\omega C R_2)$$

$$\varphi_{n1} = \pi/2 - \varphi_n = \text{arccot}(n\omega C R_2)$$

$$\varphi_n = \pi/2 - \text{arccot}(n\omega C R_2)$$

$$U_{S1} = nK\omega I_{mn} \cos(n\omega t - \varphi_n) / [(R_1/R_2)^2 + (n\omega C R_1)^2]^{0.5}$$

$$= KI_{mn} \sin(n\omega t + \varphi_{n1}) / [(R_1/n\omega R_2)^2 + (C R_1)^2]^{0.5}$$

当 R_2 为 ∞ 时

$$U_{S1} = KI_{mn} \sin(n\omega t) / (C R_1)$$

在设计应用中，为了保持运行的积分稳定，必须要并联 R_2 ，如 R_2 为无穷大时，这样带来各次谐波积分的相位误差为 $\text{arccot}(n\omega C R_2)$ ，则

$$\text{幅度误差} = C R_1 / [(R_1/n\omega R_2)^2 + (C R_1)^2]^{0.5}$$

在具体设计中，根据设计参数可以评估积分的误差。

4.5.4.1.4 信号的放大电路

信号放大电路为了适应 AD 转换的范围，如信号放大器输出电平为交流情况，应把输出交流电平转换成经整流后的直流电平，或附加一个直流电平，使正负的交流电平成为单相的带有交流分量的电平，其直流分量经 CPU 处理后滤掉。信号放大器的温漂和时漂带来的误差，藉 CPU 定时测量其直流漂移，滤去其误差。

由于信号的范围较大，同一输入信号应经过不同的放大倍数的信号放大器，输出的电平适应 AD 转换器的电平范围，可以采取程控放大器来改变放大倍数，但程控放大器的切换放大量程由于受积分电路等的影响，在动态过程中是不稳定的。故采用两种不同的放大器同时进入 AD 转换，并根据 AD 转换的结果，来判断哪一个放大器信号是适用的，其

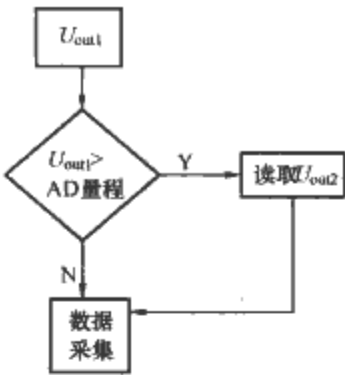


图 2.5-57 放大电路信号采集流程图

线路图见图 2.5-53，其放大信号采集流程图如图 2.5-57 所示。

AD 转换的采样频率由所采样的波形最高谐波次数来决定，理论上采样频率要等于最高谐波频率的两倍，实际上由于采样点的不确定性，可能采到的波形（采样点）的幅值较小时，带来较大的误差。实际上采用最高频率

的（4~8）倍的采样点可使得在任何情况下的误差最小，但不能超过 AD 转换器允许的最高频率。其分辨率一般为 8~10 位。目前许多 CPU 都集成了 AD 转换电路，但其 AD 转换电路和独立的 AD 转换电路相比精度较差，如要满足高精度的 AD 转换，应选用独立的 AD 转换器。

4.5.4.1.5 微机控制

完成控制器的功能对所使用的微机芯片可以有多种选择，主要是根据所完成的功能，如要完成基本功能、扩展功能、附加功能的控制器，其芯片的程序存储器，至少要 128K，数据存储器 4K，非挥发性数据存储器除了必要的初始化设定数据外，尚要记录历史数据，其存储器的容量由所记录的历史数据的大小决定。计算机指令周期 0.05μs。如人机界面采用点阵式的 LCD，显示器最好有独立的 CPU 控制。

为了程序能高速有效地执行，首先要将所完成的任务对其实时性进行分析。在程序中最重要的是完成信号采集，然后根据所采集的数据进行各种处理，所以其实时性的分析以信号采集为基准。

信号采集主要是采集三相电流，同时采样三相电压，接地或漏电电流，一次采样至少要 8 个信号，其采样周期为

$$t_s = T/n$$

式中：T 为电源周期；n 为采样点数，一般在全功能的控制器中，n 至少为 64。

任务的实时性要求由不同等级的中断控制，其实时性分析见表 2.5-31。

表 2.5-31 中断实时性分析

任务名称	中断类型	中断级别	中断触发时间	中断任务描述	任务完成时间
接受通信	通信中断	1	不定	接受数据，判断数据是否接受完成，通信是否出错，设置数据接受标志	$\leq 0.1t_s$
发送通信				发出数据，判断数据是否发送完成，通信是否出错，设置数据发送标志	
信号采集	时间中断	2	t_s	采集三相电压电流数据，接地或漏电电流储存数据，如电流值达到瞬时动作电流后，作瞬时动作处理	$\leq 0.6t_s$
键盘输入	事件触发中断	3	不定	记录键值，设置标志	$\leq t_s$
电流有效值计算	时间	4	T	根据所采集的信号电流进行有效值计算	$\leq 0.4T$
短延时、长延时、接地漏电电流	中断			根据电流有效值计算的结果，进行短延时、长延时、接地或漏电的故障判断进行相应的处理	
显示刷新	时间中断	5	0.5~1s	更新显示器内容	$\leq 0.2s$

各任务应在规定的任务完成时间内完成，如某个任务超时，可能带来不可预料的结果。在主任务周期的任务都是实时性不高的任务或为中断服务任务准备数据或处理数据。

控制器的程序流程图如图 2.5-58 所示。在主程序中，尚可实行同级任务的优先。首先建立一个任务优先表，当一个任务完成后（包括该任务经判断后不需要执行也认为该任务完成），查询是否有更高级的优先任务程序，如有，执行更高级的任务，否则顺序进行。在一个主程序开始时，任务优先表全部置位，当执行完一个任务时，清除任务。在主程序执行过程时，任务优先表的内容往往是由中断服务程序填写的，程序中本身不修改任务优先表。一般任务优先级表按每个任务执行时间长短来排列，优先级按任务的迫切性来排列。图 2.5-59 为任务执行过程。

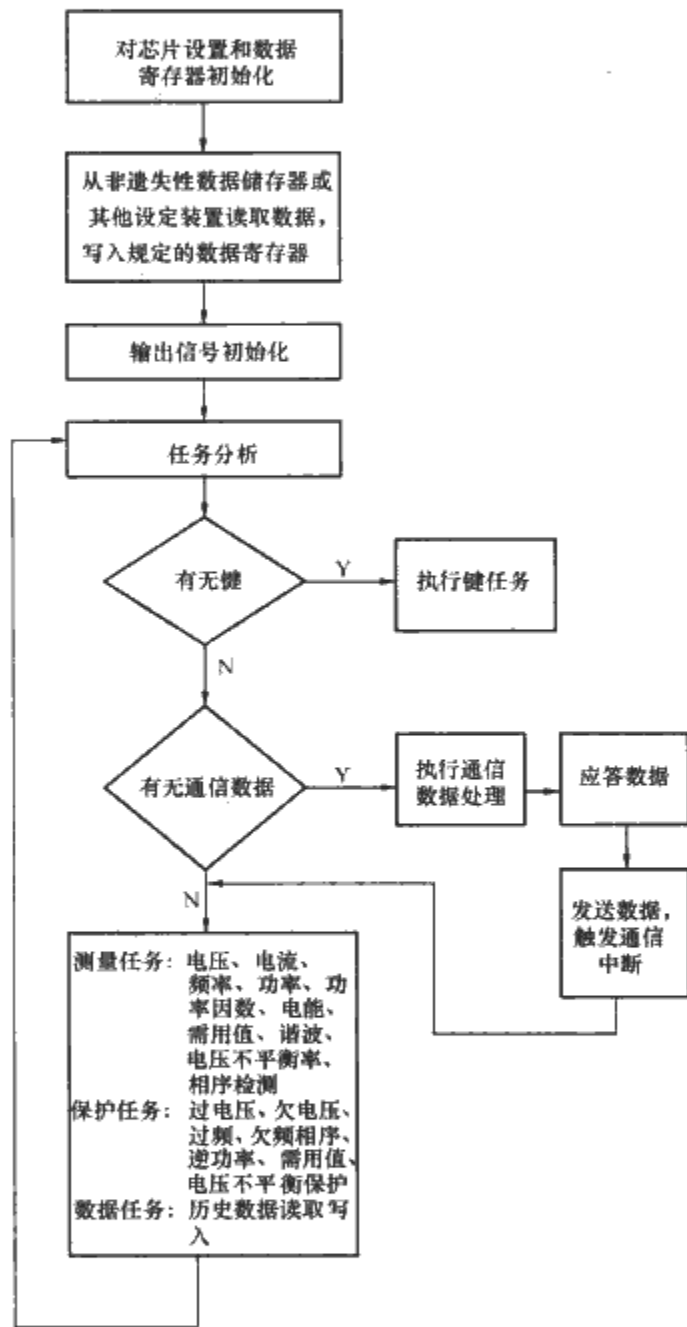


图 2.5-58 程序流程图

当程序初始化执行后，应检查执行程序是否正确，可以使程序和检查或 CRC 检查，保证执行程序的可靠，这个程序完成时间要在 $T\sim 2T$ 时间内完成，否则要延迟主程序的执行。用看门狗防止程序进入死循环，看门狗复位程序应在主程序中，不能在中断服务程序中。当控制器上电后，如看门狗动作复位或其他原因复位（非断电以后重新复位），程序为了使正常运行，应不能改变数据寄存器里的内容，复位执行后的流程图如图 2.5-60 所示。

4.5.4.1.6 信号输出

信号输出主要由脱扣器执行机构和继电器、光耦合器、三极管等构成。

执行机构为一个磁通变换器作为机械输出装置直接驱动

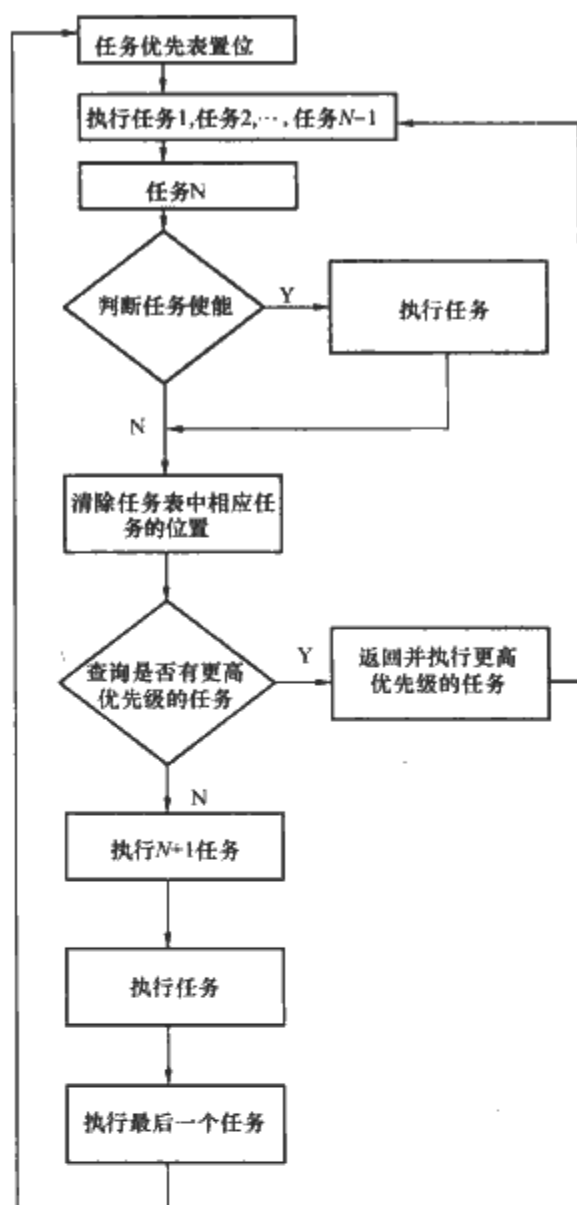


图 2.5-59 任务执行过程

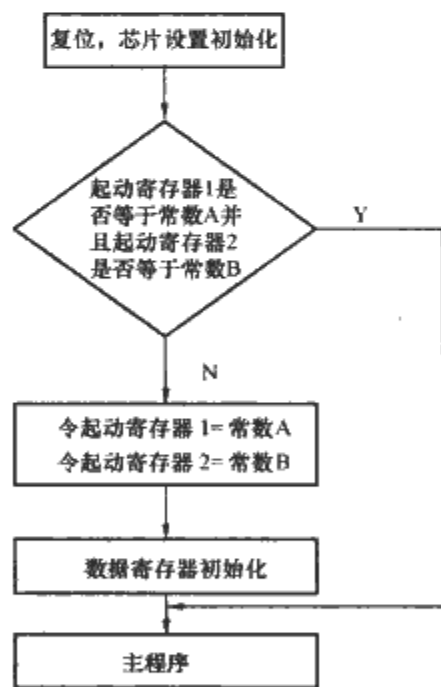


图 2.5-60 热起动过程

断路器的脱扣装置，其可靠性要求最高。脱扣执行器由永久磁铁、线圈、顶杆、弹簧、磁路组成，其结构见图 2.5-61。

其工作原理是：在正常位置时顶杆克服弹簧力由永久磁铁保持住，当线圈通以脱扣信号时，反向对永久磁铁去磁，顶杆在弹簧力的作用下，驱动断路器的脱扣装置，使断路器分断故障电流。

对脱扣执行装置主要技术要求如下：

- (1) 顶杆行程冲击力。由断路器根据机构提出要求。
- (2) 保持力。由于在断路器分合闸操作时会产生振动和冲击力，在这种情况下，脱扣器执行机构不能有误动值，这

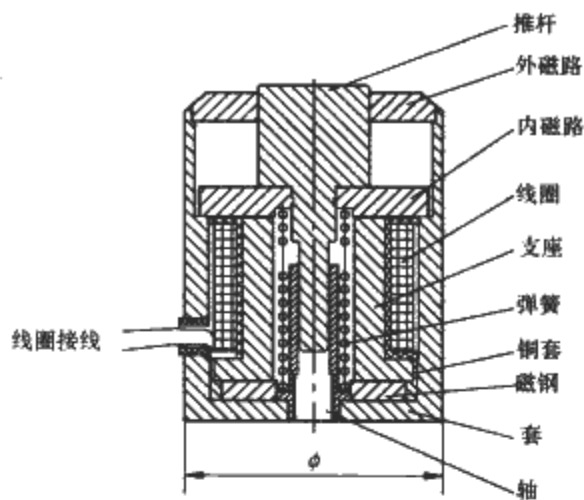


图 2.5-61 脱扣执行元件结构图

个值由断路器提出。

(3) 动作时间。当装置接受脱扣信号后至顶杆全部顶出后，一般要求在 2ms 之内。

(4) 脱扣电流。驱动脱扣执行器所需要的最小电流，在脱扣过程中为了减少脱扣执行元件的动作时间（如满足 2ms 之内所施加的电流，此电流往往大于驱动脱扣执行器所需要的最小电流）。

(5) 脱扣信号持续时间。通以脱扣电流，使脱扣执行元件可靠动作的最小时间。

由于脱扣电流较大，控制元件的电源提供脱扣电流有一定的时间限制，如果超过这个时间限制使电源电压下降，致使 CPU 和其他电子回路不能正常工作，故要求脱扣电流和可靠动作的脱扣信号持续时间不能超过控制器电源所规定的限制。

为了保证脱扣执行装置可靠动作，脱扣信号是以脉冲形式驱动脱扣执行装置，脱扣信号脉冲宽度要大于 1.5 倍的脱扣信号持续时间，也可以用多个间隔脉冲发送。当电源不能满足上述要求以致使电子电路不能正常工作，脱扣执行机构和控制器电源都要做相应的改进。

另外，信号输出还有继电器、光耦合器、三极管三种输出。上述的输出信号由 CPU 的程序控制，主要是考虑控制器的电源允许的输出能力。当有多个信号输出时，应根据同一时间最多的输出信号来考虑控制电源的能力设计，如不能满足这个要求时，输出应采取节能的方式（如继电器采用串联电阻）减少维持电流，光耦合器选用高灵敏度的器件。输出装置应注明驱动能力和工作电压。

4.5.4.1.7 人机界面

具有基本功能的控制器其输入信号用编码开关来设定控制器的参数，其输出信号采用 LCD、LED 发光管。具有全功能的控制器输入采用键盘，输出采用 LCD 点阵式显示器，由于控制器工作的微环境温度较高，所以显示器选用的温度等级应考虑微环境温度。控制器的面板如图 2.5-62 所示，DW450 控制器比 DW45 控制器体积缩小很多。采用中文图文，液晶显示，直观易懂，操作方便。

4.5.4.2 可通信智能控制器

智能控制器进一步发展可成为可通信产品。目前智能控制器主要通过现场总线进行通信。通过 Internet 网通信的控制器作为进一步的发展中。

控制器采用现场总线主要有 Modbus、Profibus、DeviceNet。通过现场总线可以对控制器进行四遥功能（遥控、遥测、遥调、遥信）。控制器可通过网关实行现场总线的转换，目前的网关主要是 Modbus 对 Profibus 和 Modbus 对 Device Net。可通信智能控制器是组成通信网络的重要部件，

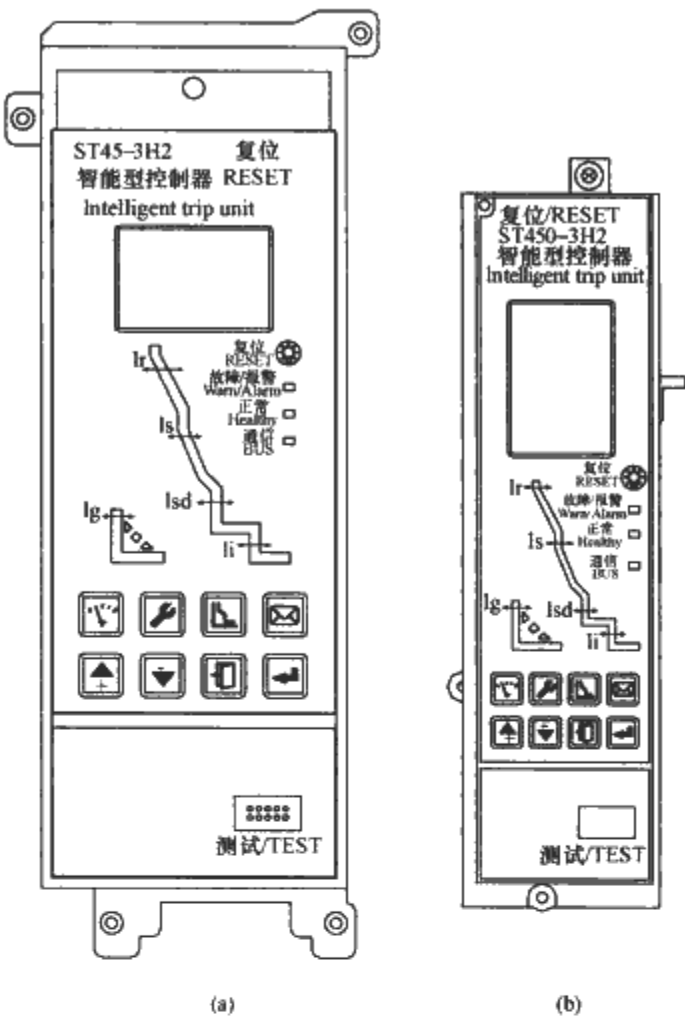


图 2.5-62 智能控制面板
(a) DW45; (b) DW450

通过通信网络可对系统进行控制调节改善系统功能。

4.5.4.2.1 通信功能硬件驱动

控制器通过协议驱动芯片或者驱动器进行通信。Profibus 采用的协议芯片为 SPC3，由于 SPC3 集成了 Profibus 规约，所以对协议的解释都由 SPC3 完成。控制器只要根据 SPC3 的结果来处理，不必关心 Profibus 的具体协议，简化了控制器的程序编制。DeviceNet 采用了 CAN 驱动器，Modbus 采用了 485 驱动器，这两种驱动器不包括协议，仅是物理上的转换。控制器的程序应包括上述两种协议的程序。

4.5.4.2.2 通信功能的程序设计

如前所述，通信功能的中断优先级最高，由于可通信控制器在组网的过程中可能使用到最高的通信速率，所以控制器的优先级定为最高级。同时，通信中断功能的中断服务程序执行时间要求很短才能不影响控制器的正常工作。所以每种总线的中断服务程序编写要求精简高效，甚至可以用汇编语言来编写，在规定的中断服务程序内完成。

(1) 对 DeviceNet 和 Modbus 的程序设计要求程序的内容应包括：

- 1) 输入数据的协议规则检查。
- 2) 输入数据和控制器数据交换的索引程序。
- 3) 控制器数据和输出数据交换的索引程序。
- 4) 将数据转换成符合协议规定的报文。
- 5) 错误报文处理。

由于驱动新片不包括协议的解释，当接受数据后，要检查输入信号是否符合协议要求。当输入数据错误时，进入错误报文处理程序；当输入数据有效时，进行报文处理；如要应答的话，发送应答报文。

(2) 对 Profibus 程序设计要求。程序的内容应包括：

- 1) 输入数据和控制器数据交换的索引程序。
- 2) 控制器数据和输出数据交换的索引程序。

3) 错误报文处理。

(3) 由于 SPC3 集成了 Profibus 规约, 已包含了对协议的解释。

4.5.4.2.3 应用范例

可通信断路器装进开关柜中成为可通信配电成套装置。图 2.5-63 所示为可通信开关柜内断路器通信线之间的连接

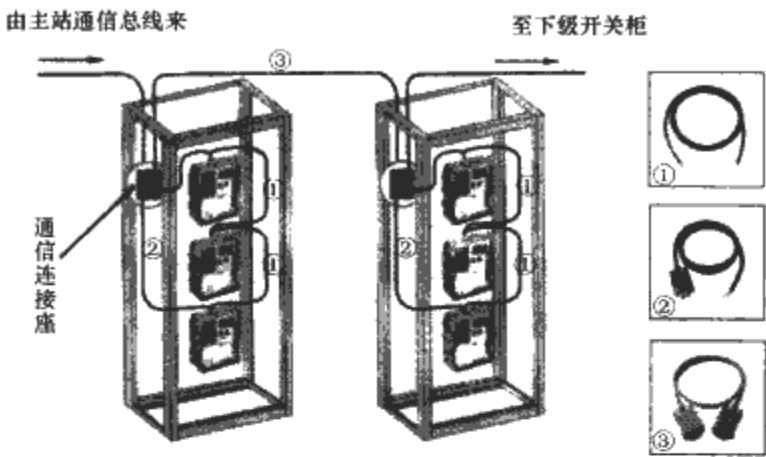


图 2.5-63 可通信开关柜内断路器通信线之间的连接示意图

示意图, 支持 Modbus 协议。通信线有三种规格, 其中: ①用于断路器之间的连接; ②用于断路器至连接座之间的连接; ③用于连接座之间的连接。其通信连接示意图见图 2.5-64。主站通过 RS485 连接, 可实现四遥功能, 即遥测、遥控、遥信、遥调。其子站通信地址和波特率可通过编程器设定。主站和子站都具有光电耦合装置, 可用于高电气干扰环境。通信响应时间为 0.2s (典型值)。断路器中采用 ST-2H 型控制。

如需采用 Profibus 协议则换成图 2.5-65。图中 ST-DP 为 Profibus 通信协议模块。主站卡为 Siemens 公司的 CP5X11, R_t 为网络终端电阻 (一般为 150 Ω)。

如需采用 DeviceNet 协议, 则按图 2.5-66 所示连接。图中 ST-DN 为 DeviceNet 通信协议模块。主站卡为 SST 公司的 5136-DNP-PCI, R_t 为网络终端电阻 (一般为 121 Ω)。1~5 五条引出线依次为: ①屏蔽层; ②24V 电源线 (+); ③ CANH; ④CANL; ⑤24V 电源线 (-)。DeviceNet 协议为 CAN 的数据链路层和物理层。

Modbus 协议最长通信距离为 1200m, 一条双绞线最多可链接 32 台断路器; Profibus 协议通信距离为 500~1000m, 视波特率而定; DeviceNet 协议通信距离为 100m。

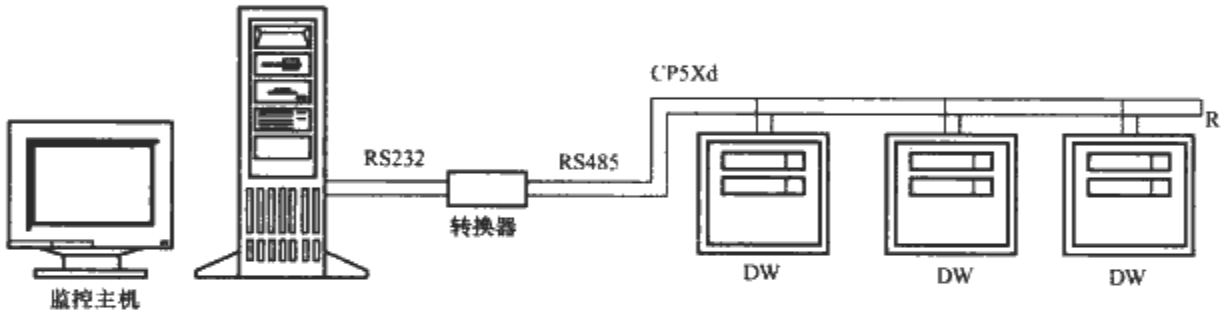


图 2.5-64 Modbus 协议通信连接示意图

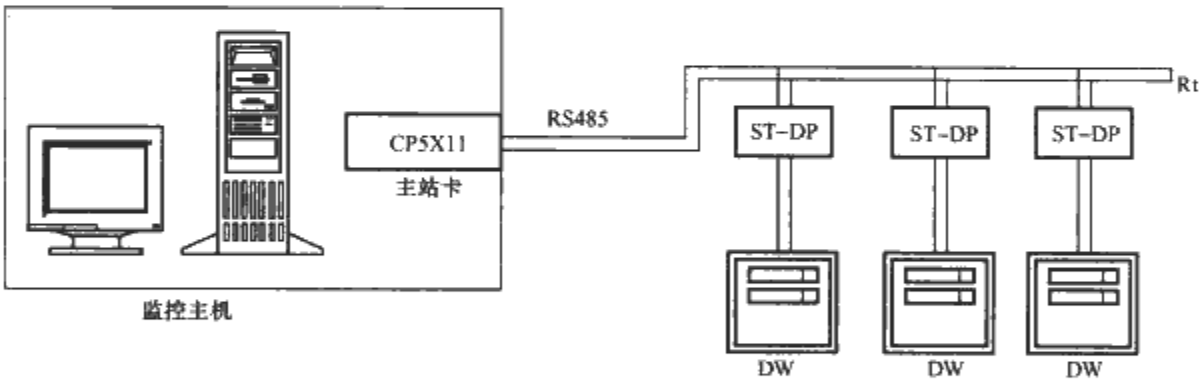


图 2.5-65 Profibus 协议通信连接示意图

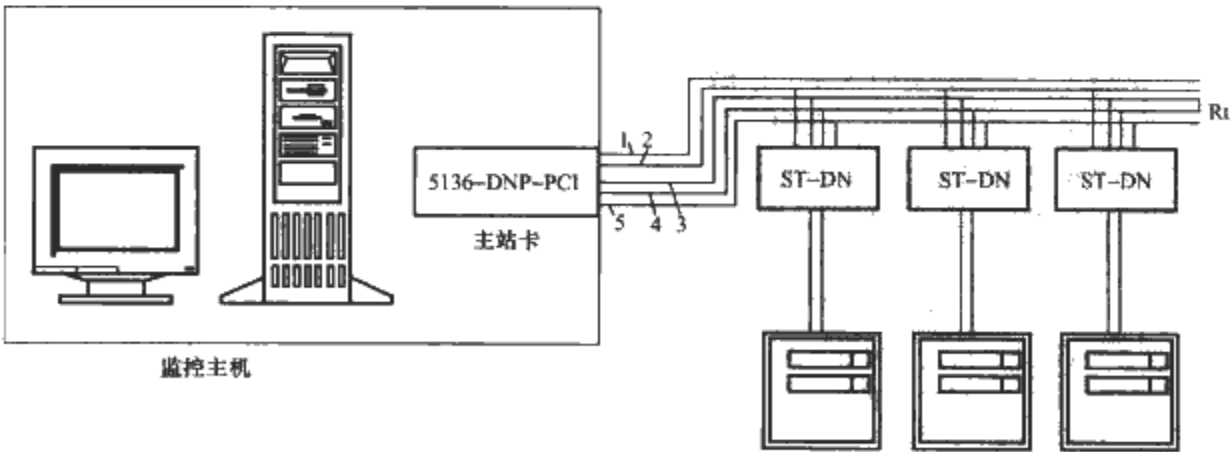


图 2.5-66 DeviceNet 协议通信连接示意图

4.6 机构

4.6.1 传动机构

断路器的传动机构按操作方式不同可分为手柄传动、杠杆传动、电磁铁传动、电动机传动和气动或液压传动五类。气动或液压传动工作性能较好，但要有相应的气压或液压发生装置。传动机构按闭合方式又可分为储能闭合和非储能闭合两种。储能闭合是预先将一弹簧压缩，然后利用弹簧释放的能量使触头闭合，其优点是能保证恒定的闭合速度，与操作速度无关。

- (1) 在选择和设计传动机构时应注意到：
- 1) 手柄和杠杆传动的最大操作力最好不超过 250N。为了满足这个要求，可以适当选择手柄长度和转动角度。
 - 2) 传动机构消耗的功率要小。大容量交流断路器可采用储能闭合和电动机传动，电动机的功率约为 0.3~1kW。
 - 3) 固有闭合时间（从闭合指令开始到断路器闭合的全部时间）要尽量小。电磁铁动作速度较快，所以在直流快速断路器和 600A 以下的交流断路器中有应用。
 - 4) 闭合断路器时冲击应尽量小。如采用交流电磁铁传动，闭合时冲击较大。用硅整流元件交流供电，可大大减小闭合时的冲击。

(2) 在设计传动机构时还应确保完成以下几个动作：

1) 在驱动力的作用下使动触头向闭合方向运动。在闭合过程中，触头压力是在行程接近终了即触头接触后，才反应到传动机构上，所以应使传动机构在行程末了阶段产生较大的力，以克服触头的反力。改变传动机构的杠杆比可达到这一目的，故目前几乎所有的断路器都采用接近或过死点的杠杆系统。小容量断路器采用一组这样的杠杆，大容量断路器则可采用两组。

2) 触头接触后应可靠保持于闭合位置。这有两种办法：一种是杠杆过死点；另一种是锁扣。前者适用于小容量断路器；大容量断路器则多采用不承受主力的锁扣。

3) 要求断开时触头应能迅速断开。一般采用弹簧来达到。若传动机构与触头系统之间是通过闭合弹簧实现，则闭合弹簧可兼作断开弹簧之用，不需要另加断开弹簧（如塑壳断路器中的操动机构）。断开弹簧的力主要应克服运动系统的惯性质量和摩擦力，以保证运动系统有一定的断开速度。

4) 触头断开后应可靠地保持在断开位置。分断短路电流时，动触头系统特别是惯性质量较大的动触头系统断开与停挡（止钉）碰撞后，可能因反弹而造成触头再接通，引起电弧复燃。为了防止反弹，尽量增大断开弹簧力是措施之一，但是这又会使闭合力增大，对传动机构不利。在停挡上加装吸收碰撞能量的阻尼装置也是一种有效措施。最简单的阻尼装置是采用牛皮垫圈。也有用空气阻尼的结构。在大容量空气断路器中，则要采用防反弹锁钩装置。当动触头系统达到断开位置时，锁钩锁住动触头系统，防止其反弹。在机构再扣时，此锁钩再度释放，以便触头系统闭合。

图 2.5-67 所示是一种惯性锁钩式防反弹装置。当触头断开时，触头连动轴绕主轴顺时针方向快速转动，当与锁钩碰撞后，在惯性作用下，锁钩绕 A 轴逆时针方向抬起，将触头连动轴勾住，使其无法反弹。碰撞消失后，靠重量下落复位，可再次操动触头闭合。

4.6.2 自由脱扣机构

自由脱扣机构的功能是实现传动机构和触头系统之间的联系。自由脱扣机构扣上时，传动机构应带动触头系统一起运动，并使触头闭合。当脱扣之后，即解脱了传动机构与触

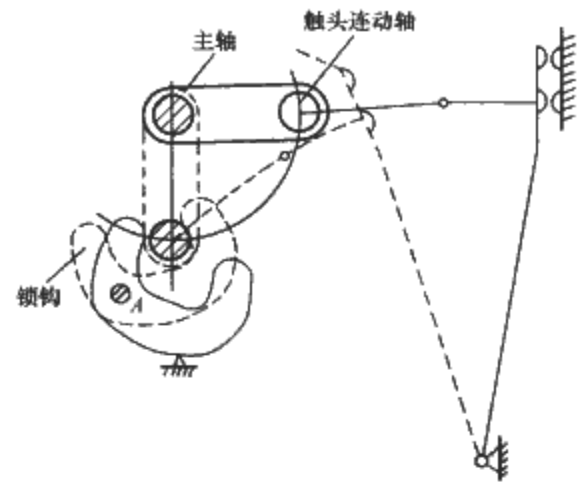


图 2.5-67 惯性锁钩式防反弹装置

头系统之间的联系，其脱扣瞬间与传动机构的位置无关。

图 2.5-68 是用来说明自由脱扣原理的简图。图中 (a) 表示没有自由脱扣的系统。当推动门手柄向左，触头闭合。但当有短路电流存在于主电路中时，触头间会出现巨大的电动力，此力可作用于人体，造成伤害。图 (b) 作了改进，将连杆 EB 分为两段；EM 和 MB。当有短路电流通过主电路时，触头被斥开，并可达断开位置，即使手柄 D 保持在闭合位置也不影响，电动力作用不到人手，即有了自由脱扣。但这种机构在 M 点的脱扣力较大，不宜采用。进一步改进成图 2.5-68 (c)。即把 M 点变成 PQ 两点，用一脱扣板联系，其 F 端扣于半轴上。当有脱扣力作用于 G 轴使其顺时针方向转动一角度，自由脱扣机构被释放，触头断开。当 GP 长度明显大于 PQ 长度时，脱扣力可大大减少。

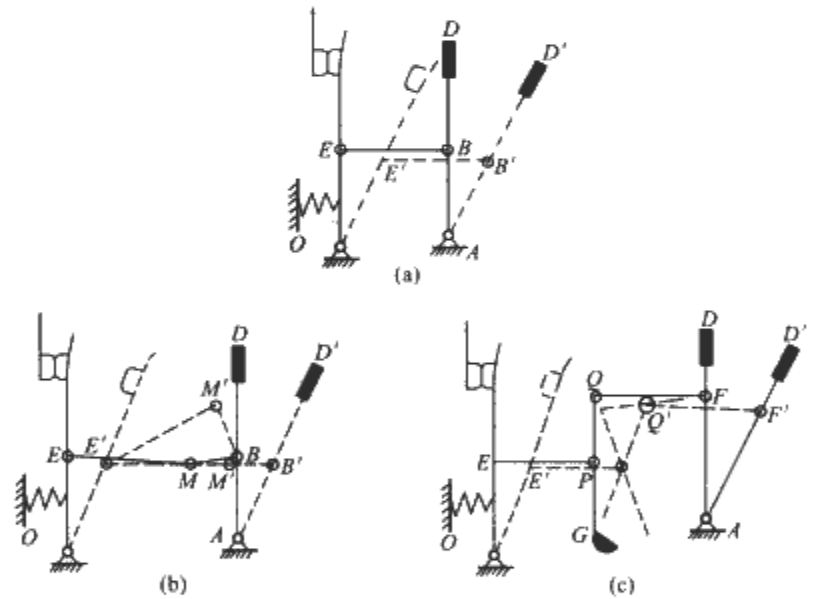


图 2.5-68 自由脱扣原理图

(a) 改进前；(b) 改进后（一）；(c) 改进后（二）

图 2.5-69 是一个用于塑壳断路器的自由脱扣机构，图 2.5-69 (a) 中机构处于脱扣位置，如要闭合操作，首先要扳动手柄（顺时针方向），使机构再扣，进入图 2.5-69 (b) 所示位置，这时再扣板被锁扣扣住，可把 O_4 看成定点，做好了闭合准备。 $O_4O_3O_6$ 组成四连杆机构，当手柄向左扳动时，弹簧力线改变并拉长，当弹簧力线越过轴 O_3 时， O_4 被弹簧拉动迅速绕 O_3 轴转动，也就是 O_4O_6 绕 O_6 转动，使触头闭合，见图 2.5-69 (c)。若要手动断开断路器，只要顺时针方向扳动手柄，使弹簧力线越过 O_3 点，则可使触头断开。过电流脱扣器或欠电压脱扣器动作均使脱扣轴顺时针转动一角度，使再扣板脱扣，四连杆变成了五连杆，断路器断开。这种自由脱扣机构简单，闭合和分断用同一根弹簧，且能达到储能闭合，在各国都可使用。其缺点为再扣力大，不适用大容量断路器。

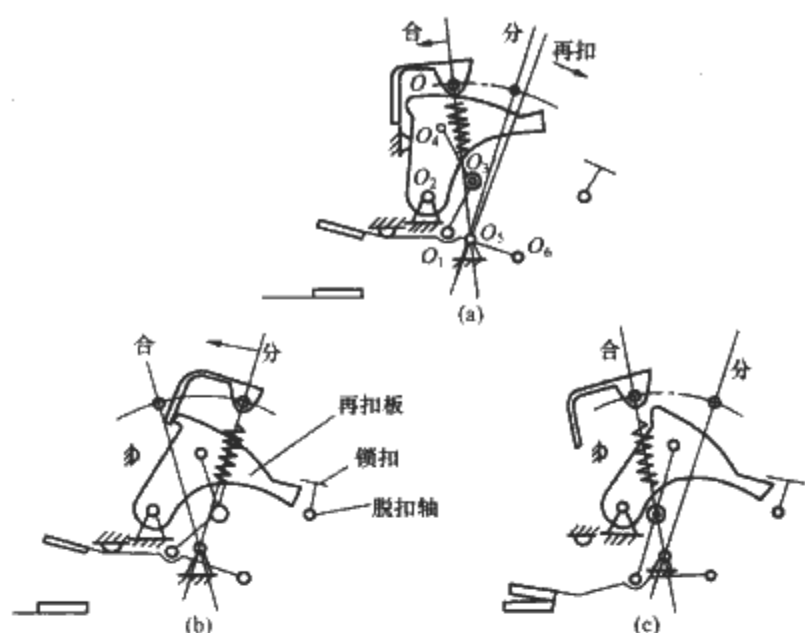


图 2.5-69 塑壳断路器的自由脱扣机构

在大容量断路器中采用有两级再扣的自由脱扣机构。如图 2.5-70 所示, L 形连杆 7 扣在杠杆 11 的滚柱上, 而杠杆 11 又扣在分断脱扣半轴 10 上。这样把机构中的巨大力可减至 10N 以下, 保证可靠脱扣。机构闭合也到用两套四连杆机构。当再扣好 L 形连杆 7 不动, 其右端 A 可视为定点, 则连杆 3、9、12 为一副四连杆, 连杆 12、13、14 为一副四连杆, 当储能杠杆上滚轮推动连杆 3 向左运动时, 可使能头达到闭合位置。

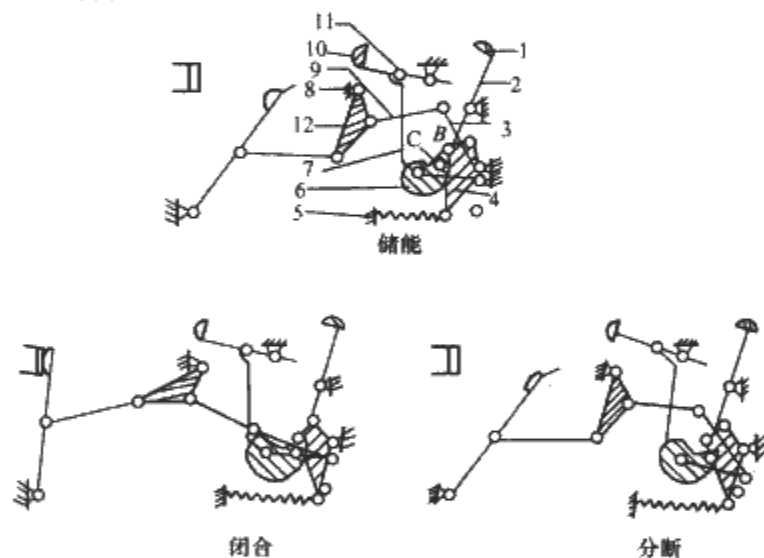


图 2.5-70 具有两级再扣的自由脱扣机构

1—释能脱扣半轴; 2—杠杆 1; 3—连杆 2; 4—储能杠杆; 5—储能弹簧; 6—凸轮; 7—连杆 1; 8—主轴; 9—连杆 3; 10—分断脱扣半轴; 11—杠杆 2; 12—连杆 4

储能是借高速电动机经变速后带动凸轮 6 顺时针转动而成, 当凸轮推动滚轮 B 至顶点时达最大储能位置, 使储能弹簧压缩。凸轮再转过一点时滚轮 B 落下, 储能弹簧力被滚轮 C 顶住, 不能释能。需闭合断路器时, 通过闭合按钮使释能脱扣半轴脱扣, 储能杠杆 4 上的滚柱推动连杆 3, 使触头高速闭合。

4.7 抽屉座

把断路器本体置于抽屉座中, 就成为抽屉式断路器。设计抽屉式断路器的目的是: 其一, 更换断路器方便, 当正在运行时的断路器一旦出现故障损坏, 可将备用的断路器快速替换。这时只要把损坏的断路器从抽屉座中摇出, 装上新的断路器即可, 明显地减少停电时间; 其二, 可作为隔离器用。若电路或设备须要检修, 为安全隔离起见, 把断路器本

体摇出, 电路即分断隔离。

设计抽屉座应注意到:

(1) 要有足够的强度, 特别呈延伸轨道的强度。因为断路器, 特别是大容量断路器很重, 抽屉座要能承受这个重量而不变形, 同时延伸轨道上应有定位, 保证断路器拉出时不致滑落, 断路器滑落是很危险的。不仅是断路器损坏, 而且可能伤害操作者。

(2) 断路器推入抽屉座或摇出尽量保持平行, 保证顺利插入。

(3) 设置绝缘安全挡板。当断路器从抽屉座中摇出时, 此绝缘安全挡板关闭, 防止操作人员不慎接触主电路的静隔离触头, 应达到 IP30 要求, 保证操作人员是安全。当断路器摇入时, 其绝缘安全挡板应自动开启, 让插入式触头顺利进入确保可靠插入。

(4) 保证三个位置: 即接通位置、试验位置、隔离位置。在接通位置时, 主电路和辅助电路 (二次电路) 均可靠接通; 在试验位置时主电路断开, 辅助电路 (二次电路) 仍接通, 这时断路器可以进行操作试验。在隔离位置, 主电路和辅助电路均断开, 且主电路隔离触头达到隔离要求。断路器达到每个位置时应有明确的指示, 特别是当断路器摇入达到接通位置时除有明确指示外, 尚要求有明确的信息, 例如“咔嚓”声响。告诉操作者断路器已安全到位, 可以投入运行。

(5) 插入式触头:

1) 主回路插入式触头有两种型式: 其一是钳夹式触头 (母触头) 置于抽屉座上, 这样断路器本体上就只有汇流排式插入触头 (公触头); 其二也可以反过来, 钳夹式触头置于断路器本体上这样固定式断路器和抽屉式断路器本体通用。但固定式断路器上也有钳夹式触头, 在装入开关柜时要有过渡插头, 以便同汇流排连接。

2) 辅助电路 (二次电路) 插入式触头也很重要。断路器的控制、保护和辅助回路的电流电压信号都要通过此插入式触头送至断路器外。除了触点数多 (40~50 点) 外, 要求在抽屉式断路器插入过程中保持接触。因此其触片要有一定的长度和足够的弹性。

(6) 联锁。当断路器本体推入抽屉座中时, 一定要在断路器断开状态下才行。因为插入式触头不能接通电流。故设计抽屉式断路器时, 要保证即使断路器在闭合时推入抽屉座, 要使其在推入过程中使断路器自动断开。相反在断路器摇出时, 则要求断路器在隔离触头尚未分断时, 触头断开, 以保证操作安全性。

(7) 摇手柄。抽屉式断路器推入或推出一般都依靠专用的摇手柄来完成, 摇手柄可以有不同型式, 例为杆式、弓式、三节式, 但断路器或抽屉座上一定要有摇手柄的放置位置。不可将摇手柄另行放置。摇手柄另行放置的缺点是容易丢失。断路器在运行一段时间后, 要用时可能一时难以找到摇手柄, 在安装断路器时也可能丢失。有的断路器设计巧妙, 当用摇手柄插入摇孔时就会先推动断路器的脱扣指, 保证断路器在推入或推出时一定会断开, 起到了很好的联锁作用。

5 选用

在低压电网中, 广泛采用空气断路器作过载、短路保护, 但是, 如果断路器选用不当或维护、修理不当, 都可能造成误动作或拒绝动作, 失去它应起的保护作用, 反而降低供电的可靠性。为此, 设计选用单位和使用单位应对断路器的结构类型、选用条件与相邻电器的配合等方面加以考虑, 并对断路器进行经常维护和修理。

子上表明只能上进线，则安装时不可采用下进线。母联断路器则一定要选用可下进线的断路器。

除一般选用原则外，应注意到断路器的用途。配电用断路器和电动机保护用断路器选用特点分别考虑。

5.1.2 配电用断路器的选用

配电用断路器是指在低压电网中专门用于分配电能的断路器，包括电源总开关和负载支路开关。在选用这一类断路器时，除考虑上述一般选用原则外，还需特别考虑把系统的故障限制在最小范围，防止故障时扩大停电区域，为此，需增加下列选用原则：

(1) 断路器的长延时动作电流整定值不大于导线容许载流量。对于采用电线电缆的情况，可取电线电缆容许载流量的80%。

(2) 3倍长延时动作电流整定值的可返回时间不小于线路中最大起动电流的电动机的起动时间。

(3) 短延时动作电流整定值 $\geq 1.1 \times (I_{lx} + 1.35kI_{ed})$
式中： I_{lx} 为线路计算负载电流； k 为电动机的起动电流倍数； I_{ed} 为电动机额定电流。

(4) 瞬时电流整定值 $\geq 1.1 \times (I_{lx} + k_1 k I_{edm})$
式中： k_1 为电动机起动电流的冲击系数，一般取 $k_1 = 1.72$ ； I_{edm} 为最大的一台电动机的额定电流。

(5) 短延时的时间阶梯，按配电系统的分段而定。一般时间阶梯为2~3级。每级之间的短延时时差为0.1~0.2s，视断路器短延时机构的动作精度而定，其可返回时间应保证各级的选择性动作。选定短延时阶梯后，最好按被保护对象的短时耐受电流加以校核。为保证选择性可考虑区域联锁。

(6) 区域联锁。为了进一步提高系统的选择性，可采用区域联锁措施。设有图2.5-71所示的电力系统，断路器分装在三级（三个区域），控制线可联锁多台断路器。区域1、区域2中的断路器都有短路延时 t_2 。当有短路电流通过断路器时，断路器经延时 t_2 分断。若在区域2下端发生短路Q2检测故障的智能控制器送一个信号给上级断路器Q1，并检查到下级断路器Q3到达的信号。如果有下级断路器送过来的信号，断路器将在脱扣延时期内保持闭合。如果下级没有送过来信号，断路器将瞬时断开，不论脱扣器是否有延时。这样减少了故障动作范围，缩短了断路器的分断时间，降低了短路电流对设备的危害，对断路器短路延时和接地故障保护都适用。

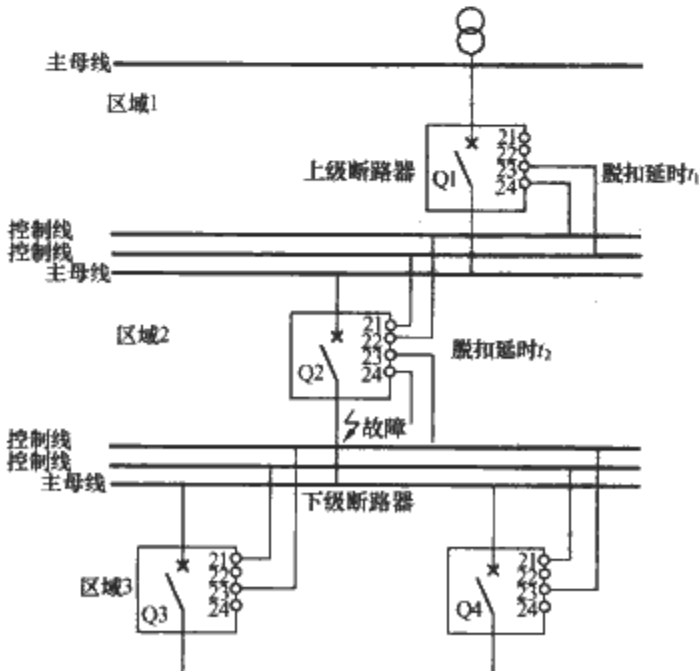


图 2.5-71 具有区域联锁的电力系统

5.1.3 电动机保护用断路器的选用

电动机保护用断路器可分为两类：一类是指断路器只作保护而不负担正常操作；另一类是指断路器需兼作保护和频繁操作之用。后一类情况需考虑操作条件和通电操作性能。电动机保护用断路器的选用原则为：

- (1) 长延时电流整定值=电动机额定电流。
- (2) 瞬时整定电流：
 - 1) 对保护笼型电动机的断路器，瞬时整定电流=（8~15）倍电动机额定电流；取决于被保护笼型电动机的型号、容量和起动条件。
 - 2) 对于保护绕线转子电动机的断路器，瞬时整定电流=（3~6）倍电动机额定电流，取决于被保护绕线转子电动机的型号、容量和起动条件。
 - 3) 6倍长延时电流整定值的可返回时间 \geq 电动机实际起动时间。按起动时负载的轻重，可选用可返回时间（s）为1，3，5，8，15中的某一挡。

5.1.4 空气断路器与上下级电器保护特性的配合要求

配电系统中，并非只有断路器，还存在许多别的电器，需考虑断路器与上下级保护电器特性的配合。最好将各个电器的保护特性绘制于坐标纸上，以比较其特性的配合情况。建议电流以横坐标表示，时间以纵坐标表示，两个坐标均用对数坐标刻度。此外，为了便于研究各种型式过电流保护装置的配合，建议电流以稳定电流的倍数表示，时间以秒（s）表示。其配合须考虑一下条件：

- (1) 断路器的长延时特性低于被保护对象（如电线、电缆、电动机、变压器等）的允许过载特性。
- (2) 低压侧主开关短延时脱扣器与高压侧过电流保护继电器的配合级差为0.4~0.7s，视高压侧保护继电器的型式而定。
- (3) 低压侧主开关过电流脱扣器保护特性低于高压侧熔化特性。
- (4) 断路器与熔断器配合时，一般熔断器作为后备保护。应选择交接电流 I_B 为断路器额定短路通断能力的80%，当短路电流大于 I_B 时，应由熔断器动作。
- (5) 上级断路器短延时整定电流不小于1.2倍下级断路器短延时或瞬时（若下级无短延时）整定电流。
- (6) 上级断路器的保护特性和下级断路器的保护特性不能交叉。在级联保护方式时，可以交叉。但交点短路电流应为下级断路器的80%。
- (7) 在具有短延时和瞬时动作的情况下，上级断路器瞬时整定电流小于或等于断路器的延时通断能力，且大于或等于1.1倍下级断路器进线处的短路电流。

5.2 直流断路器的选用

在选用直流断路器时，首先要考虑到应用场所的要求。如果对动作速度要求不高的场所，应优先考虑选用一般的直流断路器，如以交流断路器派生的产品。在电动机—发电机组、蓄电池电源情况下，可采用一般的直流断路器。在硅管整流器作电源的情况下，由于这些装置的过载能力较低，则必须采用快速断路器。

快速断路器有极性问题：无极性的直流断路器可用于馈电开关、母线联络开关和正极保护开关；正向有极性断路器可用作馈电开关、正极开关、负极开关以及逆变开关；逆向有极性断路器用作逆功率保护。

直流断路器的选用条件：

- (1) 额定工作电压 $>$ 直流线路的电压。考虑到反接制动

和逆变条件，应大于2倍电路电压。

(2) 额定电流不小于直流线路的负载电流，对地短时周期负载，可按其等效发热电流考虑。

(3) 过电流动作整定值不小于电路正常工作电流最大值，对于起动直流电动机，应避开电动机的起动电流。

(4) 逆流动作整定值小于被保护对象允许的逆流数值。

(5) 额定短路通断能力大于电路可能出现的最大短路电流。对于快速断路器初始电流上升陡度（初始 di/dt ）大于电路可能出现最大短路电流的初始上升陡度。

(6) 快速断路器分断的 I^2t 小于与其配合的快速熔断器的 I^2t 。

5.3 交流断路器选用举例

设有如图 2.5-72 所示的配电系统（其设备参数见表 2.5-33），需选用各级断路器。在选用前应对各级故障点进行短路电流计算。计算结果： $I_{k1}=31.5\text{kA}$ ； $I_{k2}=29.7\text{kA}$ ； $I_{k3}=19.12\text{kA}$ ； $I_{k4}=12.22\text{kA}$ ；末端单相对地短路电流 $I_{k41}=4.9\text{kA}$ 。

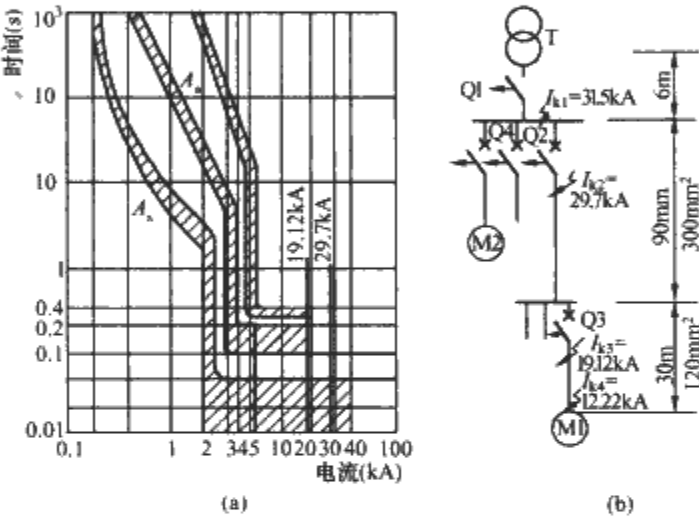


图 2.5-72 配电系统中交流断路器选用
(a) 电流—时间特性；(b) 配电系统图

5.3.1 选择断路器 Q3

由于 Q3 是保护电动机的，应选用电动机保护断路器。已知电动机额定电流为 182.4A，可选择额定电流为 200A 的断路器。由于 $I_{k3}=19.12\text{kA}$ ，应选用额定短路通断能力为 20kA 的断路器。电网电压为 380V，故断路器的额定工作电压应当 380V。查找样本和有关资料，可知可选的型号很多，如 DW15-200（短路分断能力为 20kA）、DWX15-200（短路分断能力为 50kA），均可满足此要求。如果要采用 DW50 或 DW450 系列，则采用 DW450 其 400A 断路器，脱扣器采用 200A 的，也可选用 S 系列 200A 塑料外壳断路器。

再按长延时动作电流整定值为 200A，瞬时整定电流为 $(12\times 182.4)\text{A}\approx 2200\text{A}$ 。

线路末端单相对地短路电流÷断路器瞬时脱扣器整定电流 $=4900/2200\approx 2.23>1.25$ 。当线路末端发生单相对地短路时，断路器 Q3 尚可动作而起保护作用。

考虑到电动机 M1 为异步电动机：轻载起动，6 倍长延时动作电流整定值时的可返回时间取 3s。

5.3.2 选择断路器 Q2

由于 Q2 是保护配电支路，需采用选择型配电断路器。线路计算负载电流为 600A，故可选用 630A 断路器。但由于 $I_{k2}=29.7\text{kA}$ ，应选用延时短路通断能力为 30kA 的断路器。查找样本资料结果，DW50 和 DW450 为 630A 的延时短路通断能力为 42kA，采用 630A 过电流脱扣器。

断路器 Q2 是配电系统的第二级，故短延时时间取 0.2s。

表 2.5-33 配电系统设备参数

符 号	名 称	性能参数
T	变压器	1000kVA $U_k(\%)=4$ $I_N=1445\text{A}$
M1	电动机 1	100kW $I_N=182.4\text{A}$ 起动电流倍数 6.5 倍
M2	电动机	180kW $I_N=329\text{A}$ 起动电流倍数 5.8 倍
Q1	选择型断路器	$I_{NA}=1500\text{A}$ $I_{R1}=1500\text{A}$ $I_{R2}=4500\text{A}$ $I_{R3}=30\text{kA}$
Q2	选择型断路器 2	$I_{NA}=630\text{A}$ $I_{R1}=1630\text{A}$ $I_{R2}=3000\text{A}$
Q3	电动机保护断路器	$I_{NA}=200\text{A}$ $I_{R1}=200\text{A}$ $I_{R3}=2200\text{A}$
Q4	电动机保护断路器	$I_{NA}=400\text{A}$ $I_{R1}=360\text{A}$ $I_{R3}=4800\text{A}$

注 I_N —电器（或电动机）额定电流； I_{NA} —断路器额定电流； I_{R1} —长延时动作整定电流； I_{R2} —短延时动作整定电流； I_{R3} —瞬时动作整定电流； $U_k(\%)$ —阻抗电压。

短延时动作电流整定值为 $[1.1\times (600+1.35\times 6.5\times 182.4)]\text{A}=2640\text{A}$ 。可整定在 2800A，约为脱扣器额定电流的 4.5 倍。

三倍长延时动作电流整定值时的可返回时间取 8s。

瞬时动作电流 $= (1.1\times 19.12)\text{kA}=21.03\text{kA}$ （在此设 Q3 进线处短路电流亦为 19.12kA），可整定在 22kA。

5.3.3 选择断路器 Q1

由于 Q1 是变压器主保护开关，变压器额定电流为 1445A，故选用 DW45-1600/2000 选择型断路器。延时通断能力为 50kA，将其瞬时整定电流整定在 $(1.1\times 29.7)\text{kA}$ 。当短路电流大于 30kA 时，让断路器瞬时断开，既保护了配电系统，也保护了断路器本身。

短延时时间可取 $(0.2+0.2)\text{s}=0.4\text{s}$ 。

短延时动作电流整定值大于或等于 $[1.1\times (1445+1.35\times 5.8\times 329)]\text{A}=4423\text{A}$ ，故可整定在 4500A。

长延时动作电流整定值可整定在 1600A，三倍长延时动作电流整定值时的可返回时间取 15s。

将各级断路器的保护特性绘于同一坐标图中，可以看出 Q1、Q2、Q3 各断路器可达到协调配合动作，见图 2.5-72。

5.3.4 选择断路器 Q4

此断路器的特点是直接靠近变压器安装，短路电流较大，其值为 31.5kA。

电动机 M2 的负载为空气压缩机，不频繁起动。若选用可直接起动又可进行短路保护的短路器来代替熔断器+接触器，或一般断路器+接触器，则可简化线路，较为经济。选用 DWX15-400 限流式断路器或 S 和 CM-1400A 系列塑壳断

路器可满意地工作，其短路通断能力为 50kA，具有电动操
动机构，可像接触器同样的方式操作。

其脱扣器长延时动作电流整定值可调在 0.85 倍额定电
流，即 $(400 \times 0.85) \text{ A} = 340 \text{ A}$ 。

瞬时动作电流整定值为 12 倍断路器额定电流，即 $(200 \times$
 $12) \text{ A} = 4800 \text{ A}$ 。空气压缩机属轻载起动，可选用 6 倍长延
时动作电流值时的可返回时间为 5s。

最后校核接线方向，知 DW45-2000 万能式断路器、S
和 CM1 系列塑壳断路器上下进线均可，使用安全。

6 维修

6.1 维护

断路器是一种比较复杂的保护电器，除正确选用外，还
需要妥善的维护，才能保证断路器完成预定的工作任务。断
路器在使用期内应尽量做到：

(1) 其投入使用前应将各磁铁工作面（如失压脱扣器的
磁系统吸合面）的防锈油脂抹净，以免影响磁系统的动作值。

(2) 操动机构在使用一段时间后（可考虑 1~2 年一
次），在传动机构部分应加润滑油（小容量塑料外壳式断路

器不需要）。

(3) 每隔一段时间（例如在定期检修时），应清除落于
断路器上的灰尘，以保证断路器良好绝缘。

(4) 灭弧室在因短路分断后，或较长时期使用之后，应
清除灭弧室内壁和栅片上的金属颗粒和黑烟灰。有的陶瓷灭
弧室容易破损，如发现破损的灭弧室，决不要再使用，以免
造成不应有的事故。长期未使用的灭弧室（如作为配件的灭
弧室），在需使用前应先烘一次，以保证良好的绝缘。

(5) 断路器的触头在长期使用后，如触头表面发现有毛
刺、金属颗粒等，应当予以清理，以保证良好地接触。如发
现弧触头磨损至小于原来厚度的 1/3 时，要考虑更换。

(6) 定期检查各脱扣器的电流整定值和延时，特别是智
能型脱扣器，应定期用试验按钮检查其动作情况。以确认它
是否能可靠地动作。

6.2 修理

一般小容量断路器，不考虑由用户自行修理，只有在工
矿企业中有专门检修的地方，才考虑检修一些损坏的断路
器，将断路器可能出现的故障及处理办法列于表 2.5-34 中，
以便检修时参考。

表 2.5-34 空气断路器故障一览表

序 号	故 障 现 象	故 障 原 因	处 理 办 法
1	手动操作断路器不能闭合	1. 欠电压脱扣器无电压或线圈损坏 2. 储能弹簧变形，导致闭合力减小 3. 反作用弹簧力过大 4. 机构不能复位再扣 5. 智能控制器没有复位	1. 检查线路，施加电压或更换线圈 2. 更换储能弹簧 3. 重新调整弹簧反力 4. 调整再扣接触面至规定值 5. 按控制器的复位按钮
2	电动操作断路器不能闭合	1. 操作电源电压不符 2. 电源容量不够 3. 电磁铁拉杆行程不够 4. 电动机操作定位开关变位 5. 控制器中整流管或电容器损坏 6. 智能控制器没有复位	1. 调换电源 2. 增大操作电源容量 3. 重新调整或更换拉杆 4. 重新调整 5. 更换损坏元件 6. 按控制器的复位按钮
3	有一相触头不能闭合	1. 一般型断路器的一相连杆断裂 2. 限流断路器斥开机构的可折连杆之间的角度 变大	1. 更换连杆 2. 调整至原技术条件规定值
4	分励脱扣器不能使断路器 分断	1. 线圈短路 2. 电源电压太低 3. 再扣接触面太大 4. 螺钉松动	1. 更换线圈 2. 调换电源电压 3. 重新调整 4. 拧紧
5	欠电压脱扣器不能使断路 器分断	1. 反力弹簧变小 2. 如为储能释放，则储能弹簧变小或断裂 3. 机构卡死	1. 调整弹簧 2. 调整或更换储能弹簧 3. 消除卡死原因（如生锈）
6	起动电动机时断路器立即 分断	1. 过电流脱扣器瞬时整定值太小 2. 脱扣器某些零件损坏，如半导体器件、橡皮膜 等损坏 3. 脱扣器反力弹簧断裂或落下	1. 调整瞬动整定值 2. 更换脱扣器或更换损坏的零部件 3. 更换弹簧或重新装上
7	断路器闭合后经一定时间 自行分断	1. 过电流脱扣器长延时整定值不对 2. 热元件或半导体延时电路元件变化	1. 重新调整 2. 更换
8	断路器温升过高	1. 触头压力过分低 2. 触头表面过分磨损或接触不良 3. 两个导电零件连接螺钉松动 4. 触头表面油污氧化	1. 调整触头压力或更换弹簧 2. 更换触头或清理接触面，不能更换者，只好更换 整台断路器 3. 拧紧 4. 清除油污或氧化层

续表

序 号	故 障 现 象	故 障 原 因	处 理 办 法
9	欠电压脱扣器噪声大	1. 反作用弹簧反力太大 2. 铁心工作面有油污 3. 短路环断裂	1. 重新调整 2. 清除油污 3. 更换衔铁或铁心
10	智能型脱扣器动作不稳定, 指示混乱	1. 工作电流太小 2. 动作值不正确 3. 不能复位	1. 加辅助电流 2. 重新调整 3. 复位按钮推杆卡住或断裂, 调整更换

7 断路器发展趋向

7.1 短路分断能力

目前, 我国 GB 14048.2 (等同国标标准 IEC60947-2) 中, 规定了短路分断能力 I_{cu} (额定极限短路分断能力) 和 I_{cs} (额定运行短路分断能力) 两个指标。一般情况下, I_{cu} 高于 I_{cs} 。但从各国发展情况来看, 现在开发出的新产品中有 $I_{cu}=I_{cs}$ 的趋势, 这是合理的。因为 IEC 标准中引入的这两个指标是美国 NEMA 标准和德国 VDE 标准互相妥协的结果。美国 NEMA 标准中是采用相当于 I_{cu} 的指标, 德国 VDE 标准中是采用相当于 I_{cs} 的指标来衡量断路器的分断能力。经多年相持至 1987 年, 双方同意将两个指标都列入标准中。但实施后发现了其不合理性, 即生产厂要做两套实验, 既费工又费钱, 多耗不少试品。从用户安全可靠方面考虑, 易于接受 I_{cs} 指标, 于是就往 $I_{cu}=I_{cs}$ 方向发展, 这样就要求提高 I_{cs} 的指标。在 20 世纪 90 年代初, I_{cs} 较低, 有的产品 $I_{cs}=50\%I_{cu}$ 。现在, 经过十几年的改进, 由于新结构和新材料、新工艺的应用, $I_{cu}=I_{cs}$ 已成为可能。

7.2 短时耐受电流

I_{cw} 是考核选择型 (B 类) 断路器的一项重要指标, 说明断路器承载与分断电流的能力。按国家标准规定, 一个指标就可以了, 但现在有些大公司对现代智能型断路器公布了两、三个指标, 以备选用。例如法国施耐德公司 MTN06~16 公布 0.5s、42kA, 3s、20kA; 德国西门子公司 Sentron WL 公布 0.5s, 1s, 3s 的 I_{cw} ; 美国 MAGNUM 亦如此。特别是 3s 指标的出现反映了自动控制、可编程的选择动作性方面的要求。

另外, 虽然力求 $I_{cu}=I_{cs}=I_{cw}$ 是一项更苛刻的要求, 但这项要求也在逐步实现中。例如美国 MAGNUM 系列宣布这项要求, 即实现 $I_{cu}=I_{cs}=I_{cw}$, 但其不足之处是体积较大。新近出现的富士 DH 系列断路器也实现了 $I_{cu}=I_{cs}=I_{cw}$, 这是断路器制造业的进步。应该指出, 我们要三者相等不是就低值, 而是要足够高值的相等, 这是对设计、材料和工艺各方面提出的高要求。就设计而言, 要设计有足够的动稳定、热稳定能力, 触头材料要耐磨不熔焊, 工艺上要保证零部件的精度和硬度。

7.3 壳架等级

万能式断路器的壳架等级趋向减少, 一般在 200~6300A 额定电流范围内, 200~1600A 为一壳架, 2000~4000A 为另一壳架, 4000~6300A 为大容量壳架。塑料外壳断路器一般 100~630A 范围内, 也分四个等级。

7.4 外形尺寸

断路器的外形尺寸和壳架等级的划分有关。在同一壳

架等级中, 对额定电流大者, 外形尺寸较小; 但对额定电流较小者, 就显得大些。所以, 比较外形尺寸只能就同一壳架的额定电流最大者而言。世界各国的断路器制造商都在致力于缩小断路器的外形尺寸。缩小了外形尺寸不仅可节约原材料消耗, 也可在规定尺寸的开关柜中多装断路器, 也就是说缩小了开关柜的尺寸, 有较大的经济意义。在外形尺寸中, 重要的是断路器的宽度和高度。施耐德公司的 MTN06~16 断路器, 其高度缩小到 322mm, 宽度 (三极断路器) 减小到 282mm, 成为世界上同容量万能式断路器中的最小者。西门子公司的大容量断路器 (6300A) 的宽度 (三极) 缩小至 704mm, 其设计采用各相独立结构, 取得了良好的效果。

7.5 机电寿命

这里用的是通俗名词, 应称为操作性能次数。标准对机电寿命没有过高要求, 因为断路器不需要频繁操作, 但制造商仍力图提高。从表 2.5-21 中看出, ABB 公司把 Emax 的机械寿命提高到 12~25 千次, 电寿命提高到 2~10 千次; 施耐德公司把 MT06~16 机械寿命提高到 12.5 千次。我国常熟开关制造公司在这方面也进行了努力, 机寿命提高到 15 000 次。这样做的目的不仅是商业竞争的需要, 重要的是旨在提高断路器的可靠性。

我国的断路器机电寿命偏低, 特别是机械寿命要努力提高一些。要提高寿命, 其一是要研究动力特性的配合, 使断路器在闭合和断开时的机械碰撞能量尽量减小, 降低机件的损伤; 其二是要采用新材料, 包括钢材和绝缘材料, 例如采用高强度塑料做框架, 用塑料齿轮代替钢齿轮; 其三是改进工艺方法和工艺装备, 例如焊接、淬火和弹簧制造等。提高操动机构的制造精度, 可明显提高机械寿命。

7.6 智能控制器

断路器的感受元件过去只限于过电流保护, 当电流大到超过整定值时, 使断路器脱扣, 称为过电流脱扣器。自从 20 世纪 90 年代开始, 其脱扣器进入了智能化时代, 采用微处理器进行控制, 成为智能型控制器。它除了完成过载、短路保护外, 可完成测量、指示、显示、记录、通信等功能。发展区域联锁功能可进一步提高断路器的选择性。施耐德公司、西门子公司、ABB 公司在这方面发展较快, 在显示和通信功能方面又进了一步。显示方面更形象化, 可在液晶显示器上显示运行电气参数 (如各极电流、电压等), 捕捉波形; 应用彩色液晶显示器也在考虑之中。通信方面, 断路器内部的通信规约各有千秋, 对外多支持 Modbus、Lonworks、Profibus、DeviceNet 总线规约。我国近期在发展智能型控制器方面亦有长足的进步。

7.7 常用交流断路器

常用交流断路器主要性能见表 2.5-35 和表 2.5-36。

表 2.5-35 常用万能式交流断路器主要性能汇总表

企业名称	型号规格	额定电流 (A)	额定交流短路分断能力 (kA)				寿命 (电气/机械) (千次)	外形尺寸 $H \times W \times D$ (mm×mm×mm)	飞弧 距离 (mm)	保护 装置 与性能	质量 (kg)
			I_{cu}/I_{cs}		I_{cw}						
			400V (380V)	690V (660V)	400V	690V					
统一设计产品	DW15-200	100 160 200	20/20	10/10	5(0.4s)	5(0.4s)	0.5(380V) 0.25(660V)/20	418×240×304 (固定式, 3P) 483×260×601 (抽屉式, 3P)	280	热磁式电子式 短延时	28
	DW15-400 ^①	200 315 400	25/25	15/15	8.8	8	0.25(380V) 0.15(660V)/10				29
	DW15-630 ^①	315 400 630	30/30	20/20	12.6	10	0.25(380V) 0.15(660V)/10				29
	DW15-1000 DW15-1600	630 800 1000 1600	40/40		30		0.5/5	571×687×382 (固定式, 3P)	350		55
	DW15-2500	1000 2000 2500	60/60		40		0.5/5	571×687×382 (固定式, 3P)	350		113
	DW15-4000	2500 3000 4000	80/80		60		0.5/4	571×891×382 (固定式, 3P)	400		145
联合设计产品	DWX15-200 DWX15-400 DWX15-630	200 400 630	50 50 70				5/20 2.5/10	418×240×304 (固定式, 3P) 483×260×601 (抽屉式, 3P)			29
	DW15HH-200	630 800 1000 1600 2000	50/40	30/30	0.4s 40		0.5/10	472.5×381×570	0	智能控制器 可完成各种 保护特性	抽屉式 3P 92
	DW15HH-4000	2000 2500 3200 4000	80/60		0.4s 60		0.5/5	47.2×612×530			抽屉式 3P 160
	DW16-630	100~630	30/25	20/15			1/10	444×612×530	250	热磁式 长延时 瞬时	21
	DW16-2000	800~2000	50/30	30/20			0.5/5	595×543×360	350		90
	DW16-4000	2500~ 4000	80/50	40/30			0.3/3	595×753×380	350		103
	中国引进德国ME	DW17-630 DW17-800 DW17-1000	630 800 1000	50/50		1s 0.3s 30 50		1/20(10) 10 为有预储能者	抽屉式 688×324×639 固定式 625×306×548	<500V 500	热磁式长延时 短延时钟表 机构只能 二段保护
DW17-1250 DW17-1600 DW17-1900		1250 1600 1900			50 0.3s 50				<380V 100	85 88 94	
DW17-2000 DW17-2500 DW17-2900 DW17-3200 DW17-3900		2000 2500 2900 3200 2900	80/80	80/80	0.3s 80 80		0.5/10	抽屉式 688×594×657 固定式 625×975×570	<500V 500	150 153 166 201 220	
DW17-4000		4000	100/100	80/80	0.3s 100 100		0.15/3	抽屉式 722×766×685 固定式 625×746×570	<500V 350	240	
DW17-5000		5000	100/100	80/80	0.3s 100 100		0.15/3	抽屉式 722×1000×627 固定式 625×954×570	<500V 350	260	

续表												
企业名称	型号规格	额定电流 (A)	额定交流短路分断能力(kA)				寿命 (电气/机械) (千次)	外形尺寸 H×W×D (mm×mm×mm)	飞弧 距离 (mm)	保护 装置 与性能	质量 (kg)	
			I _{cu} /I _{cs}		I _{cw}							
			400V (380V)	690V (660V)	400V	690V						
中国广州南洋电器厂引进日本 A E S	DW18-630Z	630	50/42	30/25	42	25	1.5/10	固定式, 3P 426×363.5×499 抽屉式, 3P 466×515×472		电子式 长延时 短延时 瞬时 预报警 接地保护 发电机保护 MCR 功能	3P/4P	
	DW18-800Z	800									27/38	
	DW18-1000Z	1000									28.5/59.5	
	DW18-1000Z	1000	65/50	42/30	50	30					29/61	
	DW18-1250Z	1250									31.5/63.5	
	DW18-1600Z	1600									34.5/66.5	
	DW18-2000Z	2000	85/65	50/42	50	30	1.5/8	固定式, 3P 426×500×499 抽屉式, 3P 615×650×472	38.5/71.7			
	DW18-2500Z	2500							61/116			
	DW18-2000Z	2000							64/119			
	DW18-2500Z	2500	85/65		65	40	0.5/8	固定式, 3P 426×500×499 抽屉式, 3P 615×650×472	105/160			
DW18-3200Z	3200	122/179										
DW18-3200Z	3200	158/316										
日本三菱中国公司	AE-630SS	630	65/65	50/50	65	40	5/10	固定式, 3P 426×500×499 抽屉式, 3P 615×650×472		电子式脱扣器, 长延时 短延时瞬时 预报警接地 保护 漏电保护 (电流, 时间, 分级可选)	抽屉式	固定式
	AE-1600SS	1000									66/80	44/54
	AE-1250SS	1250									67/81	44/54
	AE-1600SS	1600									67/81	44/54
	AE-2000SS	2000	85/85	65/50	65	65	1.5/10	固定式, 3P 426×500×499 抽屉式, 3P 615×650×472	68/82 45/55			
	AE-2500SS	2500							95/116		63/75	
	AE-3200SS	3200							96/117		64/76	
	AE-4000SS	4000	85/85	50/50	75	65	65	0.5/5	固定式, 3P 426×500×499 抽屉式, 3P 615×650×472		98/119 66/78	
	AE-4000SS	4000									148	112
	AE-5000SS	5000										
AE-6300SS	6300	240/ 263	160/ 180									
卡特拉汉莫 M A G N U M 中国公司	MW1-408 [®]	800	40/40		40		2.5/10	380×410/ 537×350		Digitrip RMS22oi 仅 有长延时、 瞬时保护 RM520 有 9 种相线和 接地电流保护 RM3520M 增 加了相线、 零线和接地 故障电流量计, 用四字符液 晶显示。 RMS115oi 提供可编程 功能如 1m pacc 通信能力, 区域联锁 功能		
	MW1-608	800	65/65		65							
	MW1-808	800	85/85		85							
	MW1-612	1200	65/65		65							
	MW1-612	1200	85/85		85							
	MW1-616	1600	65/65		65							
	MW1-616	1600	65/65		65							
	MW1-620	2000	65/65		65							
	MW1-820	2000	85/85		65							
	MW1-C20	2000	100/100		85							
	MW1-625	2500	65/65		100							
	MW1-825	2500	85/85		65							
	MW1-632	3200	65/65		65							
	MW1-832	3200	85/85		85							
	MW1-C32	3200	100/100		100							
	MW1-640	4000	65/65		65		2.5/10	380×869/ 135×355				
	MW1-840	4000	85/85		85							
	MW1- C40	4000	100/100		100							
	MW1-E40	4000	150/150		150							
	MW1-850	5000	85/85		85							
	MW1-C50	5000	100/100		100							
	MW1-C63	6300	100/100		100							
	MW1-E50	5000	150/150		100							
	MW1-E63	6300	150/150		100							

续表

企业名称	型号规格	额定电流 (A)	额定交流短路分断能力 (kA)				寿命 (电气/机械) (千次)	外形尺寸 $H \times W \times D$ (mm×mm×mm)	飞弧 距离 (mm)	保护 装置 与性能	质量 (kg)						
			I_{cu}/I_{cs}		I_{cw}												
			400V (380V)	690V (660V)	400V	690V											
奇崎中国公司	AT06	630	35/35	22/22	35	30	固定式 500×380/465×442 抽屉式 492×368/453×560		IB 过电流脱扣 器分三类: AOR-1BL 配电 用 AOR-1BM 强 反时限 I^3t , I^4t AOR-B Bs 发电机保护	98							
	AT12	1250	65/65	50/50	50	45				106							
	AT16	1600	65/65	50/50	50	45				113							
	AT20	2000	65/65	50/50	50	50				115							
	AT25	2500	65/65	50/50	65	50				125							
	AT32	3200	85/85	50/50	80	65				188							
	AT40	4000	85/85	50/50	80	65				211							
西门子中国公司	Senfro						10/10	抽屉式, 3P 434×460×290	具有 ETU45B ETU55B 和 ETU76B 三种控制器 通过内部总线 Cubiclebus 可使得外部附 件与断路器 相连, 通过 Profibus 即 可传输数据	抽屉式 3P							
	3WL1110	1000	N	S	P	H		固定式, 4P		45							
	3WL1112	1250	50	65	42	100		460×590×385		45							
	3WL1116	1600					7.5/10	抽屉式, 3P 434×460×290 固定式, 4P 460×590×385		0	45						
	3WL1208	800									4/10	60					
	3WL1210	1000											60				
	3WL1212	1250												60			
	3WL1116	1600	55	80	50	55									60		
	3WL1220	2000														63	
	3WL1225	2500					65										
	3WL1232	3200						82									
	3WL1240	4000								82							
3WL1350	5000					90											
3WL1363	6300								90								
											2/5	抽屉式, 3P 473×704×241 固定式, 4P 460×914×385	82				
							82										
								90									
										10/25				418×296/386×302	0	PR111 能实现各 种保护 PR112、 113 具有完善的 保护特性和通 信功能, 可实 现区域联锁、 负载监控测量、 谐波计算。借 助于 LCD 可通 过图表、矩形 图测量电气 参数、支持 Lon 和 Modbus 协议	抽屉式3P/4P 70/82
E1 B	800	42/42	36/36	36	10/25	418×296/386×302											
N	800	50/50	36/36	36	10/25	418×296/386×302			70/82								
E2 B	1600	42/42	42/42	42	15/25	418×296/386×302					78/93						
N	1250	65/65	55/55	42	12/25	418×296/386×302	78/93										
L	1250	130/170	85/85	—	4/20	418×296/386×302		80/95									
E3 N	2500	85/85	85/85	65	8/20	418×404/530×302				104/125							
S	1250	75/75	75/75	65	12/20	418×404/530×302						104/125					
H	1250	100/100	85/85	65	9/20	418×404/530×302			104/125								
L	2000	130/130	85/85	—	5/15	418×404/530×302					110/127						
E4 S	4000	75/75	75/75	75	5/12	418×566/654×302	147/165										
H	3200	100/100	100/85	75	4/12	418×566/654×302		147/165									
E6 H	5000	100/100	100/100	85	3/12	418×810/938×302				210/240							
V	6300	150/125	150/100	100 85	2/12	418×810/938×302						210/240					
L G 公司中国公司	LBA 1	1600	65/65	50/50	50	5/10			376×335/423×430				带智能控制 器, 可完成 各种保护 功能				
	2	3200	65/65	65/65	60				371×423/603×430								
G E 中国公司	M-pact				3s	5/10	440×329/429×422 440×418/549×512				M-pro 智能控 制器可实现 各种保护, 显 示及通信功能						
	1	2500	65/65	40/40	50												
	2	4000	70/65	60/40	65 50												

① DW15-400,630 有 1140V 等级, 固定式, 3P, I_{cu} 、 I_{cs} 分别为 10、12kA。
② 型号后二位数是额定电流代号, 例如 08 即 800A; 倒数第三位是额定短路电流等级代号, 例如 4 即 40kA, 8 为 85kA, C 为 100kA。

续表

企业名称	型号规格	额定电流 (A)	额定交流短路分断能力 (kA)			寿命 (电气/ 机械) (千次)	外形尺寸 $H \times W \times D$ (mm×mm×mm)	飞弧 距离 (mm)	保护装置与 性能	质量 (kg)
			I_{cu}/I_{cs}		I_{cw}					
			400V (380V)	690V (660V)						
天津百利电器公司	TM30-63W	6~63	S 25/25 H 50/50			6/8.5	88.5×76 (100) ×135 98.5×76 (100) ×135			3P 1.1
	TM30-100W	16~100	S 35/26.2 H 50/35.5 R 85/85 U 100/100	8/4 10/5		1.5/8.5	86×90 (120) ×155 104×90 (120) ×155 86×90×215 86×90×215			1.4 1.7 1.7 2.4
	TM30-225W	100~225	S 35/26.2 H 50/35.5 R 85/1000 U 1000/100			1/7	110×100 (140) ×165 127×105 (140) ×165 100×105×240 100×105×240			2.3 2.8 2.8 3.3
	TM30-400W	200~400	S 50/35.5 H 65/48.8	10/—	5	1/4	155×140 (183.5) ×257			6.6
	TM30-630W 800W	250~800	S 50/50 H 65/65 U 100/75	10/—	8	0.5/2.5	155×210 (280) ×275			10.5
	TM30-1250	630~1250	S 65/37.5 U 100/50	20/—	15	0.5/2.5	191×210×330			18.5
	TM30-1600 2000	1000~2000	S 65/48 U 100/100	25/—	24	0.5/2.5	302.5×393×330			45
日本三菱中国公司	NF-32	32	C 1.5/1.5 S 2.5/1	S 2.5/—	—	15/30	130×50 (2P) ×68 130×75 (3P) ×68		液压式 热磁式	
	NF-63	63	C 2.5/15 S 7.5/4 H 10/5	2.5/— 7.5/— 2.5/—	—	15/30	130×75 (3P) ×68 130×100 (4P) ×68		热磁式 电子式	
	NF-125	125	C 10/5 S 36/36 H 65/65 U 200/200	7.5/— 8/— 20/— 30/—	—	3/5	130×105×68 165 (H) ×140×86 240 (U) H. U		热磁式可调	
	NF-160	160	S 36/36 H 70/70	8/— 20/—	—	1/2.5	165×105×86 165×140×86		热磁式可调 电子式可调	
	NF-250	250	C 18/9 S 36/36 H 70/70 U 200/200	10/— 8/— 20/— 70/—	—		165×105×86 240×140×86 U		热磁式可调 电子式可调	
	NF-400	400	C 36/36 S 45/45 H 125/125 U 200/200	15/— 10/— 15/— 35/—	—		257×140×106 (322) ×185×200 U U		热磁式可调 电子式可调	
	NF-630	630	C 36/36 S 45/45 H 125/63 U 200/200	18/— 10/— 20/— 35/—	7.5 电子式		275×210×103 322×280×200 U 4P U		热磁式可调 电子式可调	
	NF-800	800	C 36/36 S 45/45 H 125/63 U 200/200	18/— 10/— 20/— 35/—	9.6 电子式		275×210×103 322×280×200 U 4P		电子式可调	
	NF-1000	1000	S 85/43	25/—	20 电子式		406×210×140 406×280×140 4P		电子式可调	
	NF-1250	1250	S 85/43 U 125/63	25/— 85/—	20 电子式		406×210×140 406×280×140		电子式可调	
	NF-1600	1600	S 85/43	25/—	20 电子式		406×210×140 406×280×140		电子式可调	

第6章 自动转换开关电器

1 概述

自动转换开关电器 (Automatic Transfer Switching Equipment, ATSE), 主要用于两路电源供电系统, 当电源发生故障时, 将负载电路从一个电源自动转换到另一个 (备用) 电源的开关电器, 以确保重要负荷连续、可靠运行。因此, ATSE 常常应用在重要用电场所, 其产品可靠性尤为重要。转换一旦失败将会造成电源间的短路或重要负荷断电 (甚至短暂停电), 其后果是严重的, 这不仅仅会带来经济损失 (使生产停顿、金融瘫痪), 也可能造成社会问题 (危及人身生命安全)。因此, 工业发达国家都把自动转换开关电器列为重点产品加以规范。

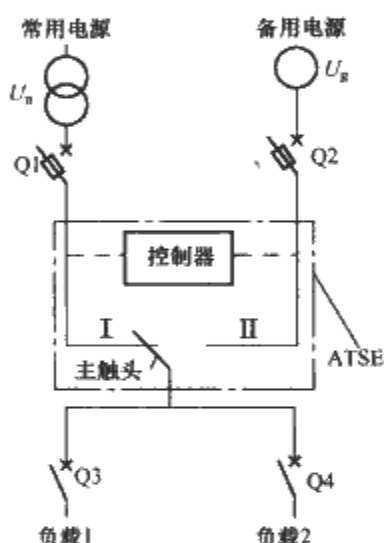


图 2.6-1 ATSE 应用的典型电路

$Q1$ 、 $Q2$ —熔断器隔离器或断路器

按照我国建筑设计规范的要求, 一、二类用电负荷应采用两路电源供电。因此, 自动转换开关电器已被广泛应用到医疗、金融、通信、机场、商务大楼、大型商场、体育场、工业生产领域及军事设施等重要供电场所, 以及建筑消防供配电等领域。

ATSE 应用的典型电路如图 2.6-1 所示。

1.1 ATSE 标准

UL1008 是世界上第一部有关自动转换开关电器产品制造标准, 它于 1903 年颁布。

1989 年国际电工委员会 (IEC) 依据 UL1008 制定了第一部关于自动转换开关电器标准, 即 IEC 60947-6-1: 1989 (1.0 版)《低压开关设备和控制设备 第 6-1 部分: 多功能电器-自动转换开关电器》; 事隔 9 年 (1998 年), IEC 修订了该标准, 即 IEC 60947-6-1: 1998 (1.2 版); 2005 年 8 月, IEC 修订并出版了 IEC 60947-6-1: 2005 (2.0 版), 新版的标准名称也有所变化, 为《低压开关设备和控制设备 第 6-1 部分: 多功能电器-转换开关电器》, 简称为 TSE。

我国于 2002 年制定了 GB/T 14048.11—2002《低压开关设备和控制设备 第 6 部分: 多功能电器 第 1 篇: 自动转换开关电器》, 它等同采用 IEC 60947-6-1: 1998 (1.2 版)。该标准将是 ATSE 生产制造企业、设计使用单位、商业活动共同遵循的一部技术性法规文件, 也将是产品认证的依据。随着 IEC 标准的修订, GB/T 14048.11—2002 将被修订为 GB 14048.11—200×《低压开关设备和控制设备 第 6-1 部分: 多功能电器 转换开关电器》。

1.2 国内外 ATSE 产品情况简介

ATSE 在我国是一类新兴的低压电器产品, 仅有 10 多

年生产历史。而美国的 ATSE 应用有近百年历史。从产品技术指标、性能以及产品结构来看, 美国的 ATSE 产品代表着当今世界先进水平。美国对 ATSE 产品性能要求较高, 他们视 ATSE 为电源一部分, 其产品可靠性和性能 (如额定限制短路电流、接通分断能力、电寿命) 均处于国际领先水平。产品共同特点是, 开关本体为专门设计的一体式结构, 机构简单 (为转换机构), 转换速度快, 电气性能指标高。除基本型外, 还有瞬间并联型、旁路隔离型、延时转换型等 ATSE 产品。目前, 美国 ATSE 产品生产规模较大的企业有 GE、康明斯等, 主要生产专用的 PC 型 ATSE (PC-4 型)。

目前, 在国内 ATSE 市场产品品牌约有几十家, 如上海电器科学研究所 (集团) 有限公司、施耐德万高、深圳泰永、沈阳斯沃、无锡韩光、TCL、上海华通电气、常熟开关厂、杭州之江、天津百利、扬州新菱、苏州飞腾、上海日野等; 国外品牌有法国朔高美、美国 GE、康明斯、日本高田等。

2 结构与工作原理

ATSE 一般由开关本体和控制器两部分组成。

开关本体的主要功能是完成两路电源间的转换。

控制器的主要功能是用来检测被监测电源 (两路) 工作状态, 当被监测的电源发生故障 (如任意一相断相、欠电压或频率出现偏差) 时, 控制器发出动作指令, 使开关本体带着负载从一个电源自动转换至另一个电源。

2.1 ATSE 的分类

2.1.1 开关本体分类

(1) 按短路能力分:

1) PC 型: 能够接通、承载、但不用于分断短路电流的 ATSE。

2) CB 型: 配备过电流脱扣器的 ATSE, 它的主触头能够接通并用于分断短路电流。

(2) 按开关基本结构分:

1) 专用的 ATSE: 开关本体是专门设计的一体型产品。

2) 派生的 ATSE: 开关本体由其他开关电器组合而成的。

2.1.2 控制器分类

(1) 按结构分:

1) 继电器型: 由欠电压继电器、时间继电器、频率继电器等分立元件组合而成。

2) 电子型: 由电子电路实现逻辑控制。

(2) 按功能分:

1) 经济型: 由简易电路 (延时时间固定) 实现操作的控制器。

2) 智能型: 由数字电路实现程序操作的控制器。

3) 通信型: 带有通信功能的智能型控制器。

2.1.3 各类典型产品的分类

目前, 国内外 ATSE 市场有 7 类典型结构。

第1类 PC-1型：以双稳态电磁铁操作为特征的专用型PC型ATSE。

第2类 PC-2型：以两台开关组合为特征的派生型PC型ATSE。

第3类 PC-3型：以具有两组动触头3个工作位为特征专用的PC型ATSE。

第4类 PC-4型：以单电操带转换机构为特征专用的PC型ATSE。

第5类 CB-1型：由两台MCB断路器派生的ATSE。

第6类 CB-2型：由两台MCCB断路器派生的ATSE。

第7类 CB-3型：由两台ACB断路器派生的ATSE。

2.2 开关结构特点与工作原理

目前，我国的企业也生产上述7类ATSE产品，PC型ATSE有4类（PC-1、PC-2、PC-3、PC-4），而由断路器派生的CB型ATSE也有3类（CB-1、CB-2、CB-3）。

2.2.1 PC-1型产品结构特点与工作原理

PC-1型属专门设计的转换开关本体，它的操动机构是由双稳态电磁铁构成，它的结构示意图如图2.6-2所示。这类产品的代表企业有日本、韩国、丹麦等国家的公司。

它的基本工作原理是：通过两组电磁铁（A、B）来实现动触头转换。A线圈通电，动触头被吸合到A电源侧；B线圈通电，动触头被吸合到B电源侧。主触头仅有2个工作位。该产品优点是机构简单，触头转换速度快；而缺点是触头开距小，灭弧能力较差，电器的使用类别较低，一般仅能达到AC-31。

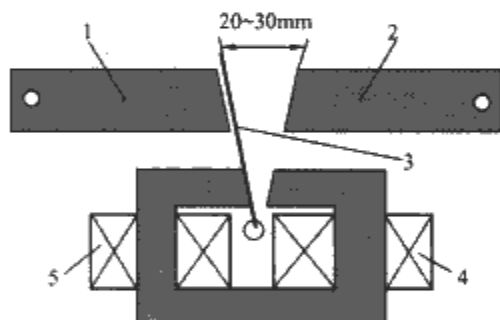


图 2.6-2 PC-1 型结构示意图

1—电源；2—电源B；3—动触头；4—B电磁铁；
5—A电磁铁

2.2.2 PC-2型产品结构特点与工作原理

它一般是由两台隔离开关（或开关）组合而成，属于派生的PC型ATSE，结构示意图如图2.6-3所示。

它的工作原理是：两台开关（或隔离开关）通过一台电

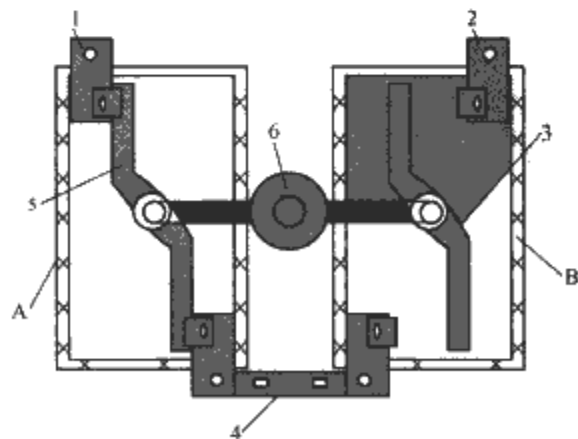


图 2.6-3 PC-2 型结构示意图

A—开关1；B—开关2；1—常用电源；2—备用电源；
3—动触头B；4—负载端；5—动触头A；
6—电动机及减速机构

动机的正、反转操作，完成动触头A、B的合与分，从而实现电源的转换。

这类产品的特点是：主触头可有3个工作位置，且带有隔离功能；开关的触头开距有较大的提高，使用类别可达到AC-23（等同AC-33）。主体部分的开关（或隔离开关）一般符合GB 14048.3—2002《低压开关设备和控制设备 第3部分：开关、隔离器、隔离开关以及熔断器组合电器》产品标准。这类产品代表企业有法国等欧洲国家。

2.2.3 PC-3型产品结构特点与工作原理

PC-3型属专门设计的转换开关本体，它有2个动触头、3个工作位置，通过3个电磁铁的操作来实现开关的转换。其结构示意图如图2.6-4所示。这类产品代表企业有深圳泰永、苏州飞腾等公司。

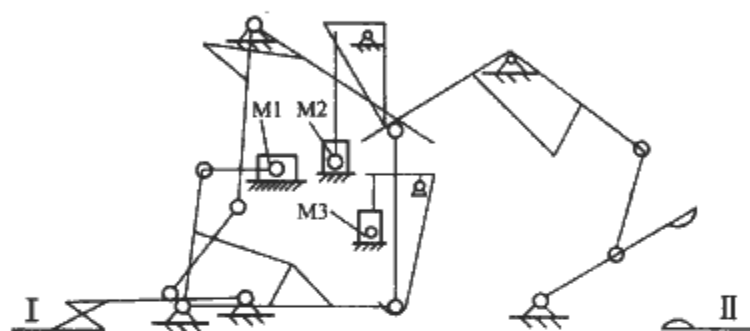


图 2.6-4 PC-3 型结构示意图

它的转换过程大致需要下列两个环节。

第一环节：M3电磁铁吸合，脱扣连杆6逆时针离开，“死点”8被解扣，触头I断开。

第二环节：M1电磁铁吸合，L杆7逆时针旋转，带动推杆4向上运动，此时，M2电磁铁吸合保障L杆5顺时针旋转，直到触头II闭合为止，M2释放。

该类产品特点是一体式产品，触头有3个工作位置，对大容量感性负载的转换有利。

2.2.4 PC-4型产品结构特点与工作原理

PC-4型属专门设计的转换开关，它的机构是由一个电磁铁和转换机构构成。其结构如图2.6-5所示。它的代表企业有美国GE及上海电器科学研究所（集团）有限公司等。

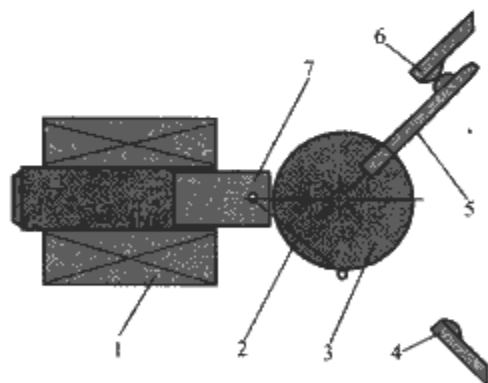


图 2.6-5 PC-4 型开关结构图

1—电磁铁；2—拉杆；3—转换机构；4、6—静触头；
5—动触头；7—衔铁

它的工作原理是：电磁铁1吸合时带动转换机构3旋转，当动触头5离开静触头6后，电磁铁1被释放，动触头5转换到静触头4一侧。

该类产品结构特点是：

(1) 只有一个动触头，不会造成两路电源同时被接通

事故。

(2) 触头仅有 2 个工作位置，可确保供电的连续性。

(3) 开关的触头开距大，易于拉断电弧，转换过程安全。

(4) 具有两个灭弧室，易于电弧熄灭，不会造成灭弧室内游离气体二次击穿。

(5) 单台电磁铁操作，机构简单，转换速度快。

(6) 使用类别可达到 AC-33。

2.2.5 CB 型 ATSE (CB-1、CB-2、CB-3 型) 结构特点

它们的开关本体分别是由 MCB (CB-1 型)、MCCB (CB-2 型)、ACB (CB-3 型) 断路器及电动机操动机构和机械连锁组合而成，属派生的 ATSE。其特点是具有短路保护和过载保护功能。国内市场常见的几种 ATSE 产品特点汇总见表 2.6-1。

表 2.6-1 国内市场常见的几种 ATSE 产品特点汇总表

操作方式	触头系统	联锁机构	电器级别	主触头工作位置数	本体结构	结构图	生产国家或厂家
1 只电磁铁	单/双刀双掷式	无需	PC 级 (PC-4)	2/3	一体式	—	美国 GE 等
1 只电磁铁	单/双刀双掷式	无需	PC 级 (PC-4)	2/3	一体式	图 2.6-5	上海电器科学研究所等
2 只电磁铁	单刀双掷式	无需	PC 级 (PC-1)	2	一体式	图 2.6-2	日本、韩国等
3 只电磁铁	双刀双掷式	无需	PC 级 (PC-3)	3/2	一体式	图 2.6-4	泰永、飞腾等
单台电动机	双刀双掷式	机械	PC 级 (PC-2)	3	派生	图 2.6-3	法国、德国等
单台电动机	断路器	机械	CB 级	3	派生	—	

2.3 控制器基本结构与工作原理

数字电子式控制器一般由 5 个基本环节组成：

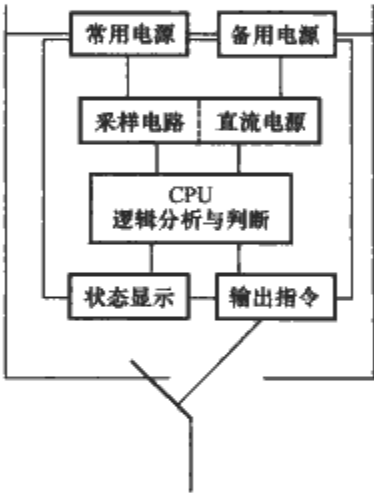


图 2.6-6 控制器基本功能框图

- (1) 采样电路。
- (2) 直流电源。
- (3) 逻辑分析与判断。
- (4) 状态显示。
- (5) 指令输出。

其逻辑框图如图 2.6-6 所示。

2.3.1 采样电路

采样电路是控制器第一道关口和第一个屏障。它的结构形式很重要，关系到控制器 EMC 及可靠性问题，它起到第一滤波作用。目前控制器的采样电路有以下几种方式：①

电阻分压采样；②变压器采样；③光耦采样；④电压互感器采样。

2.3.2 直流电源

直流电源是控制器的工作电源。一般有两路输出，一路 DC 约 5V；另一路 DC 12V。DC 5V 主要为 CPU 提供电源，它要求精度较高、稳定性要好，它直接影响 CPU 工作的稳定性及控制器的可靠性。DC 12V 为输出继电器提供电源，精度、稳定性要求相对不高。

2.3.3 CPU 逻辑电路

CPU 逻辑电路是控制器的核心，它对两路电源输入的 (6 线 8 相) 信号进行分析和判断，并发出动作指令使 ATSE 转换。CPU 建议采用工业级产品，其适应环境能力强，抗干扰性好。

2.3.4 状态显示

最简单的显示器为发光二极管，它经济耐用；第二种为数码管，它有量的概念，亮度高，也是经济耐用产品；第三种方式为液晶显示器，它显示的信息量大，是高档控制器的首选产品。但因 ATSE 是 24 小时连续工作的产品，且在紧急状况下用户希望及时了解到电源信息状况，该显示器在亮度及寿命方面存在一定不足，希望在开发这类产品时注意弥

补这方面缺陷。

2.3.5 输出电路

控制器的输出指令一般通过继电器的触点合分来实现。选用时应注意继电器的触头额定工作电压及额定工作电流。因 ATSE 的控制电路和辅助电路与主电路工作电压一致。当主电路负载为三相时，希望控制器的额定工作电压为 400V，否则用户接线或使用不当易造成烧坏控制器的事故。另外，继电器的触头容量一般按非电感性使用类别给出，而 ATSE 操动机构一般为电磁铁或电动机。所以，继电器的触头容量按实际负载的 3 倍来选取，才能确保继电器可靠使用。

2.4 可通信控制器

在数字式控制器的基础上增加通信接口 (RS485)，可直接与 Modbus 网络连接或通过专用的通信适配器与 Profibus-DP、DeviceNet 现场总线连接，把开关本体的概要数据、工作状态和设定的参数传送给主站，主站也可以把控制命令下达给控制器，实现对 ATSE 的远程监控，从而达到电气系统优化运行的目的。也可通过本地控制或网络控制对 ATSE 控制器进行参数设定。可通信控制器工作原理框图如图 2.6-7 所示。

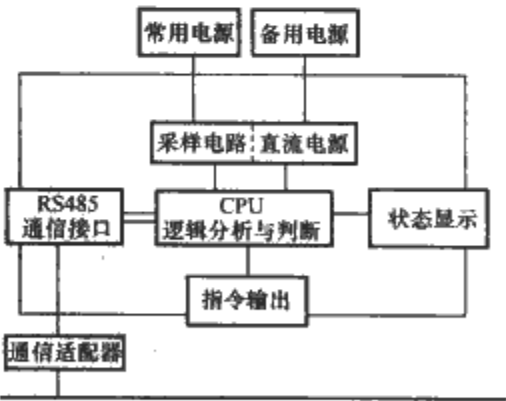


图 2.6-7 可通信控制器功能框图

3 主要产品技术参数与性能

3.1 GE-Zenith 系列产品主要技术参数与性能

GE-Zenith 自动转换开关电器 (ATSE) 生产已有 75 年历史。目前，它有 3 大类 9 个系列 PC 型 ATSE 产品 (PC-4

型)。除了有基本型产品外,还有旁路隔离型;延时转换型;暂态停留型;瞬间并联型产品。

3.1.1 GE-Zenith 产品主要技术参数

GE-Zenith 产品系列及主要技术参数见表 2.6-2。

表 2.6-2 GE-Zenith 系列产品主要技术参数

类 型		应急/备用 电源	应急/备用 电源	家用和商业 照明
基本型		ZTS	ZTG	ZTX
延时转换		ZTSD	ZTGD	
瞬时并联转换		ZTSCT		
旁路—隔离转换		ZBTS		
延时转换/旁路— 隔离转换		ZBTSD		
瞬时并联/旁路— 隔离转换		ZBTSCT		
额定电流 (A)		40~4000	40~3000	40~400
极数 (P)		2, 3, 4	2, 3, 4	2, 3, 4
额定电压 (V)		480, 600	480, 600	480
使用类别		AC-33A	AC-33A	AC-33A
转换时间		≤100ms		
电器级别		PC 型	PC 型	PC 型
主触头工作位置		40~400A; 2 100~4000A; 3	40~400A; 2 100~3000A; 3	2
额定限制 短路电流 (kA)	熔断器	200	200	200
	断路器	10~100	10~100	30~50
	专用断路器	30~100	30~100	
控制器		MX250 微处理器	MX150 微处理器	MX60 微处理器

3.1.2 ZTS 产品功能简介

3.1.2.1 ZTS 基本型自动转换开关

GE-Zenith 的开关机构为电磁铁操作及机械保持。ZTS 的瞬间励磁确保触头在 100ms 以内完成电源间的转换。

3.1.2.2 ZTSD 型延时转换开关

ZTSD 系列在闭合触点断开之后和断开触点闭合以前提供一段可以调节的时间延迟,该延迟时间考虑到电动机的旋转惯性和变压器磁场的衰减,从而使感抗负载在切换之后只受到起动电流冲击。这种延迟处理在此类应用中特别有效。

3.1.2.3 ZTSCT 型瞬间并联的转换开关

它们是由 ZTS/ZTSD 型转换开关与同步检测控制器组合而成,当两个电源处于预置参数范围内(当两路电源同在预定电压和频率之下,相角差小于 5°时)时,它们具有瞬间并联转换的可能。利用 ZTS 的高速驱动系统,正常电源与备用电源之间的重叠小于 100ms。

3.1.2.4 ZBTS 型旁路—隔离转换开关

ZBTS 型旁路转换开关由两个主要模块组成——自动转换开关和旁路隔离开关。自动转换模块采用的是 ZTS 系列,旁路部分是一个配备有快速接通/快速分断的手动负载转换手柄和包含机械和电气的联锁。旁路部分附带一个正常电源故障检测和时间延迟,用以在卸下 ATSE 进行维护和系统发生故障的情况下自动起动发动机。自动转换开关在不影响负载的情况下,可取出进行测试与维护。

3.1.3 MX250 控制器的主要性能

GE-Zenith 控制器主要有三个系列,其中 MX250 性能最为先进,功能强大。MX250 控制器主要性能见表 2.6-3。

表 2.6-3 MX250 控制器主要性能

控制器型号		MX250	备注
液晶 显示	电源状况(常、备电压值)	○	
	主触头位置指示	○	
	电源故障:断相、欠电压、 过电压、不平衡	○	
	电源故障:频率	○	
主要 功能	自动/手动	○	
	多级用户口令保护	○	
	起动、关闭发电机组	○	
	发电机组定期测试(天)	7, 14, 28, 365	可选
	加、卸负荷	○	
	相角同步检测	相角, ±5°; f, ±0.2Hz; U, ±5%	
	瞬间并联	100ms	
	延时转换	○	
	电梯停留自控	○	
	远程报警	○	
	通信(两种网卡)	Modbus RTU, Lonwork, 以太网	可选
	记录档案	○	
	失电压、断任意一相	○	
	欠电压	75%~98%±1%	可调
电压、 频率运 行检测	过电压	102%~115%±1%	可调
	返回	85%~100%±1%	可调
	相间不平衡	5%~20%	可调
	相间不平衡返回	3%~18%	可调
	相序检测	○	
	低频率	88%~98%±0.2%	可调
	高频率	102%~110%±0.2%	可调
	返回频率	90%~100%±0.2%	可调
	避正常电源干扰延时	0~6	可调
	延时转换至备用电源	0~360	可调
时间 设定 (s)	备用电源瞬间加载干扰延时	0~6	可调
	关闭发电机延时	0~360	可调
	返回转换延时	0~360	可调
	卸/加负荷延时	0~300	可调
	现场试验	○	
工作电压 (V)		AC 220/380; DC 24	
EMC 认证		8 项 EMC 试验	严酷

注 ○表示有该项功能。

3.1.4 ZTS 产品结构

ZTS 基本型产品外形如图 2.6-8 所示。

3.2 TP1 系列产品主要技术参数与性能

TP1 自动转换开关电器(ATSE)是由上海电器科学研

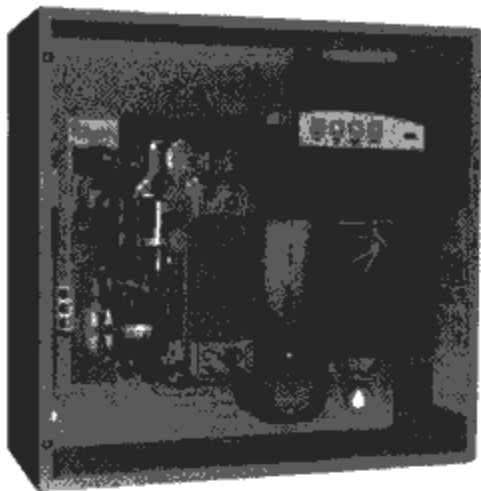


图 2.6-8 GE-ZTS/400A 自动转换开关电器

究所（集团）有限公司组织国内知名企业常熟开关制造有限公司、TCL 低压电器、上海日野电气有限公司等多家单位共同开发的我国新一代 PC 型 ATSE（PC-4 型）。

3.2.1 TP1 产品主要技术参数

3.2.2 TP1 产品特点

- (1) 产品可靠性好，适应环境能力强：
 - 1) 工作环境温度：(55~−15)℃。
 - 2) 工作电压范围：(75%~120%) U_N 。
- (2) 开关结构为积木式，体积小，是同类产品体积最小之一。
- (3) 主触头系统自身联锁，不会造成同时接通两路电源故障现象。
- (4) 操动机构简单（见图 2.6-5），动作速度快，转换动作时间是目前国内同类产品最小之一。
- (5) 主触头切换容量大，负载使用类别为 AC-33B，且能在两路电源相序不同下完成切换。
- (6) 控制器共有三种规格，经济型、智能型和通信型。通信型控制器适应三种总线协议（Modbus、Profibus、DeviceNet）。

TP1 主要技术参数见表 2.6-4。

表 2.6-4 TP1 主要技术参数				
型 号		TP1		
电器级别		PC 级 (PC-4 型)		
额定工作电压		AC 400V/50Hz		
额定电流 (A)		100	200	400
额定工作电流 (A)		32, 63, 100	125, 160, 200	225, 630, 400
极 数 (P)		2, 3, 4	2, 3, 4	3, 4
控制电路电源电压 (V)		AC 230, AC 400		
使用类别		AC-3、AC-33B	AC-33B	AC-33B
额定限制短路 电流 (kA)	熔断器	100	100	120
	断路器	10	20	35
电气操作 (次数)		1000	1000	1000
机械操作 (次数)		15 000	15 000	10 000
转换动作时间 (ms)		15~50	30~100	80~150
总动作时间 (ms)		150	200	250
触头工作位数		2		

3.2.3 TP1 产品结构

TP1 产品外形如图 2.6-9 所示。

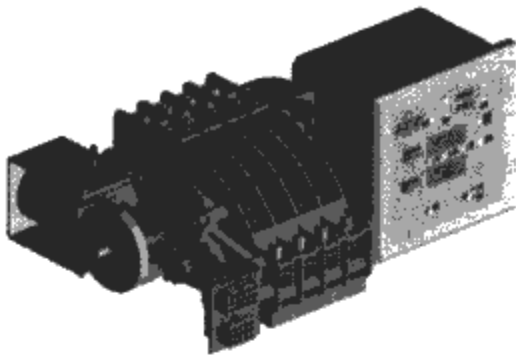


图 2.6-9 TP1-200 自动转换开关电器

3.3 TBBQ3 系列产品主要技术参数与性能

TBBQ3 系列自动转换开关电器是由深圳泰永科技有限公司自主研发的 PC 型 ATSE，产品共有 9 个规格，其中最大规格到 5000A 是目前国内产品规格之最。

3.3.1 TBBQ3 产品特点

- (1) 开关本体为专用型一体式 PC 型 ATSE。
- (2) 机械保持，主触头闭合后被锁定在接通位置，机构脱扣后主触头才能断开。
- (3) 主触头有三个工作位，V 形机构保证两路电源不会被同时接通。
- (4) 触头接触面宽，压力大。保证产品具有良好的短路性能。
- (5) 触头开距大，有专用的灭弧室且采用银质触头，接通与分断能力强，使用类别达到 AC-33A/B。
- (6) 控制器共有 4 种产品，它分经济型（CⅠ）、经济型（CⅡ）、智能型（CⅢ）和通信型（CⅣ）。通信型控制器带有 RS485 通信接口，并为液晶显示。

3.3.2 TBBQ3 系列产品主要技术参数

TBBQ3 系列产品主要技术参数见表 2.6-5。

3.3.3 TBBQ3 产品结构

TBBQ3-5000A/4P 产品外形机构如图 2.6-10 所示。其外形尺寸（长×宽×高）为 1490mm×628mm×395mm。

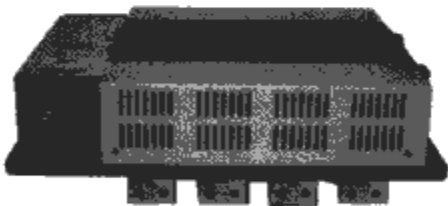


图 2.6-10 TBBQ3-5000 自动转换开关电器

3.4 WTS 系列产品主要技术参数与性能

WTS 自动转换开关是施耐德万高新推出 PC 型 ATSE。

3.4.1 WTS 产品特点

- (1) 适应要求较高的工作环境，在温度+60℃情况下无需降容使用。
- (2) 有较高的短路接通能力，额定短路接通能力 (I_{cm}) 15~50kA。
- (3) 在分断与转换过程中能做到了零飞弧。
- (4) 传动机构具有机械与电气交叉互锁，可确保两路电源不会被同时接通。
- (5) 具有隔离功能。
- (6) 新一代数字化控制器功能强，带有 RS485 Modbus 通信模块，它采用 MODBUS-RTU 通信协议。

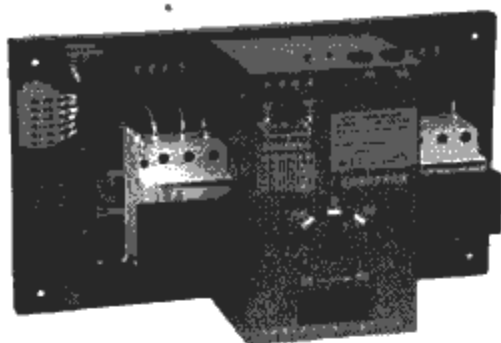


图 2.6-12 WATS-C65 自动转换开关电器

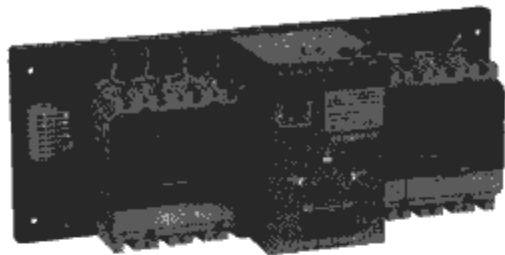


图 2.6-13 WATS-NS 自动转换开关电器

4 设计要点

4.1 PC 型 ATSE 设计要点

4.1.1 灭弧系统设计要点

自动转换开关电器 (ATSE) 主要是带着负载在两路电源间转换, 以确保重要负载连续工作。两路电源间一般存在相位角差异的问题, GB/T 14048.11—2002《低压开关设备和控制设备 第 6 部分: 多功能电器 第 1 篇: 自动转换开关电器》中所规定的 ATSE 试验电路如图 2.6-14 所示。动触头从电源 I 位置离开时将产生一次电弧; 当动触头闭合到电源 II 位置时又产生一次电弧。在 ATSE 灭弧室内必须能有效地分断这两个电弧, 否则电弧就会出现重击穿现象, 造成其转换失败。

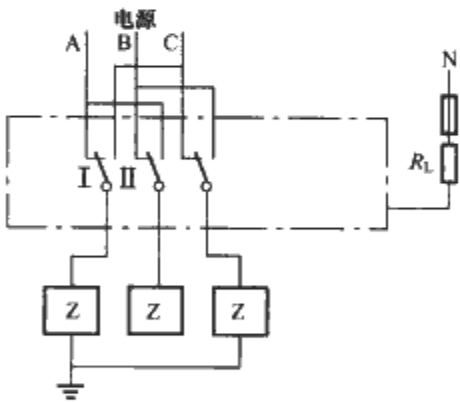


图 2.6-14 ATSE 电气性能试验线路图

因此, 专用的 PC 型 ATSE 设计必须注意以下两点:

(1) 动、静触头间应有足够的开距, 这样有利于拉长电弧的长度, 提高熄灭电弧能力。开距大小与转换开关额定电流有关。

(2) 灭弧室分为几个区域, 带有排气孔更佳, 这样有利于游离气体的排放和介质强度的恢复, 防止电弧的重击穿。图 2.6-15 所示的是 TP1 自动转换开关电器灭弧系统, 它的触头开距约 260mm, 灭弧室分成两个区域。

为防止上述现象发生, 国家标准规定派生的 PC 型 ATSE 的断电时间应不小于 50ms。

4.1.2 承受短路性能的设计要点

根据 GB/T 14048.11—2002 的规定, ATSE 短路电流性能试验后, 触头仍能以正常方式进行闭合与断开, 并能承载额定工作电流。

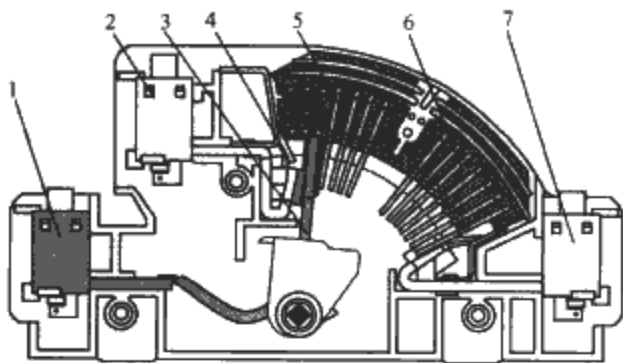


图 2.6-15 TP1-200 灭弧系统结构图

1—负载接线端; 2—常用电源接线端; 3—动触头;
4—引弧角; 5—灭弧室; 6—灭弧室 B;
7—备用电源接线端

PC 型 ATSE 因不具备分断短路电流能力, 当电路发生短路时 ATSE 应能承受短路电流的冲击, 直到短路保护电器动作。为了提高耐受短路电流冲击的能力, ATSE 的触头压力要求较大, 以避免由于短路电流产生的斥力造成触头熔焊。

4.1.3 选用触头材料的要点

由于 ATSE 有两组触头, 其实际使用有其特殊性。在一路触头闭合接通电路时, 另一路备用触头断开, 由于断开的备用触头长时间暴露在空气环境中, 触头材料易氧化, 当闭合备用电源时, 备用触头易出现接触不良现象。因此, ATSE 的触头结构及所选用的触头材料应充分考虑其使用情况的特殊性可能带来的问题。

ATSE 对触头基本要求是:

- (1) 不易氧化。
- (2) 具有一定抗熔焊能力。
- (3) 触头结构在闭合时应有相对的位移, 或带有弧触头。

4.1.4 操动机构设计要点

根据 GB/T 14048.11, 对操动机构的要求如下:

- (1) 在所有情况下, 操动机构都应被联锁以防止同时接通常用电源和备用电源。
- (2) PC 型 ATSE 的操动机构不应使负载电路与常用电源和备用电源均保持长期断开。

因此, ATSE 动触头的结构采用一组理想结构 (见图 2.6-15), 该结构既可确保在所有情况下, 动触头不能同时接通常用电源和备用电源, 又能保证负载电路与常用电源或者备用电源保持接通状态。

另外, ATSE 的操动机构应简单、灵活, 响应速度快, 以减少负载断电时间。

4.2 CB 型 ATSE 设计要点

CB 型 ATSE 是由两台断路器组合而成, 产品设计主要是操作机构和连锁机构。目前, 国内 CB 型 ATSE 的操作机构与连锁机构一般采用合为一体机构, 即采用单台电动机通过减速齿轮减速及电动机的正、反转来推动机构完成断路器的合、分。该类机构设计时应注意各级减速齿轮间的配合及电动机的合理选择。

国家标准规定, 转换控制操作时应注意断电时间不应小于 50ms。

4.3 控制器设计要点

数字电子式控制器一般由 5 个环节组成, 其逻辑框图如

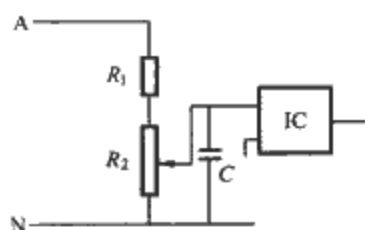


图 2.6-16 电阻分压采样电路

图 2.6-6 所示。

其中，采样电路是控制器第一道关口和第一个屏障，它的结构形式很重要，关系到控制器 EMC 性能及可靠性问题，它起到第一滤波作用。

目前控制器的采样电路有以下几种方式：①电阻分压采样；②变压器采样；③光耦采样；④电压互感器采样。它们有各自优缺点。

4.3.1 电阻分压采样

电阻分压直接采样电路如图 2.6-16 所示。它通过串联电阻分压后将电源信号经滤波电路直接输入到 IC 电路中。这种电路比较简单、经济，但信号精度较低，抗干扰性也较低。

4.3.2 变压器采样

变压器采样的原理如图 2.6-17 所示，一般只取常用电源的一相电路，以（A 相）为例。常用电源的 A、N 与变压器的输入端相连，经整流桥把交流信号变为直流信号，但此时的直流信号并不能直接输出到单片机的管脚上，可以通过一个适当的分压器 \$R\$ 得到适合的电压值，再经过电容 \$C\$ 滤波，此时得到的电压信号 \$U_o\$ 输出到单片机的信号采集端口上。经过这样一系列的过程，就完成了变压器的采样。单片机采集到电压信号后可以对其数据进行处理，并执行相应的动作。其优点是电路简单，有一定抗干扰能力；缺点是采样精度不高。

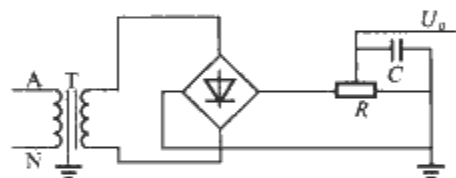


图 2.6-17 变压器采样电路

4.3.3 光耦采样

光耦采样电路如图 2.6-18 所示。它可以同时检测三相电源。当 A、B、C 三相平衡时，d 点电压 \$U_d=0\$；当电源任意一相发生断相或三相不平衡，d 点电压 \$U_d\$ 不为零，光耦（G）被导通，IC 电路受触发后发出动作信号。

该方案光耦为短期工作制不易老化，抗干扰性好；缺点是检测的信号精度也较低。

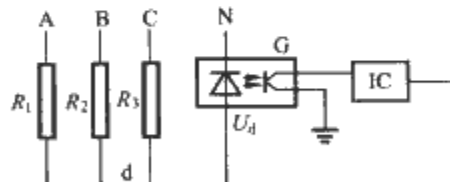


图 2.6-18 光耦检测电路

4.3.4 电压互感器采样

电压互感器采样电路如图 2.6-19~图 2.6-21 所示。



图 2.6-19 电压互感器采样电路（一）

图 2.6-19 中，TV 为电压互感器，对信号起隔离作用，其一次侧一般需要加限流电阻。电压信号输入到 TV 的一次

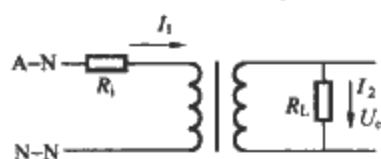


图 2.6-20 电压互感器采样电路（二）

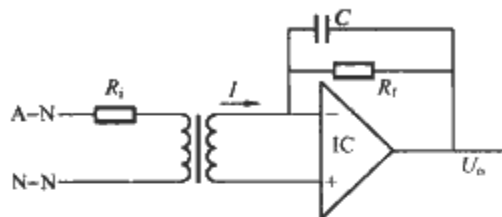


图 2.6-21 电压互感器采样电路（三）

侧，由限流电阻限制其电流在规定范围内，同时互感器的二次侧感应出一定大小的电流，此时可以采用两种方法采样电压值，第一种接线方法如图 2.6-20 所示，可以在输出端并联电阻 \$R_L\$ 直接得到取样电压。第二种接线方法如图 2.6-21 所示，可以在输出端接运算放大器 IC，把电流信号转换成电压信号，调节反馈电阻 \$R_f\$ 的值在输出端得到所要求的电压输出 \$U_o\$，电容 \$C\$ 用来补偿相移，\$R_i\$ 为输入端的限流电阻。

采用电压互感器进行采样，采样精度可以得到提高，但成本会增加。在对采样精度要求较高的场合可以采用此种方式。

5 选用与维修

5.1 PC 型 ATSE 选用要点

选用 PC 型 ATSE 时应注意以下几点。

5.1.1 按短路能力选择

（1）PC 型 ATSE 的额定限制短路电流值或额定短时耐受电流值不应小于电路的预期短路电流值。

（2）当制造商只给定 ATSE 的额定限制短路电流值时，应注意短路保护电器（SCPD）的型式——断路器或熔断器，并注意 SCPD 的型号。电路中的短路保护电器的选择应尽可能与 SCPD 的型号或性能保持一致。

（3）当制造商只给定 ATSE 的额定短时耐受电流值时，应注意 ATSE 允许最短通电时间。GB/T 14048.11—2002 规定的最短通电时间为：

1) 额定工作电流不大于 400A 时，交流（50Hz）为 30ms，直流为 25ms。

2) 额定工作电流大于 400A 时，交流（50Hz）为 60ms，直流为 50ms。

5.1.2 按使用类别选择

电器的使用类别确定电器的用途，也就是说 ATSE 的使用类别一旦被确定，其使用范围也被确定。表 2.6-8 列出不同使用类别所对应的负载性质。根据负载性质选择对应的 ATSE 使用类别，可保障 ATSE 的安全使用。

表 2.6-8 ATSE 的使用类别

使用类别	典型用途	接通与分断条件		
		I/I_N	U_r/U_N	$\cos\varphi$
AC-31	无感或微感负载	1.5	1.05	0.80
AC-32	通断阻性和感性的混合负载，包括中度过载	3.0	1.05	0.65
AC-33i	笼型电动机及阻性混合负载	6.0	1.05	0.50
AC-33	笼型电动机负载	10.0	1.05	①

使用类别	典型用途	接通与分断条件		
		I/I_N	U_r/U_N	$\cos\varphi$
AC-35	放电灯负载	3.0	1.05	0.50
AC-36	白炽灯负载	1.5	1.05	②
DC-31	电阻负载	1.5	1.05	无 (L/R)
DC-33	电动机负载或包含电动机的混合负载	4.0	1.05	2.5
DC-36	白炽灯负载	1.5	1.05	②

① 当 $I_N \leq 100A$ 时 $\cos\varphi=0.45$ ，当 $I_N > 100A$ 时 $\cos\varphi=0.35$ 。
② 在电路接通 5ms 内达到瞬态接通电流的峰值。

对于低的使用类别（例如 AC-31）用到高的使用类别（例如 AC-33i）时，ATSE 应与负载侧的控制电器（如接触器）具有联锁功能，在电路开路（空载）的情况下，ATSE 转换才能确保安全。

5.1.3 按转换时间选择

一些重要负载超过其允许的断电时间会影响其正常工作。因此，应依据负载要求来选择相应的 ATSE。不同的 ATSE 其转换速度也不同，一般专用型两位置的 PC 型 ATSE 转换速度较快（断电时间 15~200ms），三位置 PC 型 ATSE 转换速度次之（断电时间 75~800ms），派生的 PC 型 ATSE 转换速度再次之（断电时间 800~3000ms），而 CB 型 ATSE 转换速度更慢（断电时间 1500~3000ms）。

5.2 CB 型 ATSE 选用要点

CB 型 ATSE 增加了过电流保护功能，在选择该类产品应注意以下几个问题。

5.2.1 由塑壳断路器（MCCB）派生的 CB 型 ATSE 的选择要点

CB 型 ATSE 具有过电流脱扣器，当它在图 2.6-22 所示电路中使用，应注意上下级断路器保护特性配合问题。当负载发生过载或短路时，下级断路器（Q3）脱扣时若引起上级断路器（Q1）脱扣断开，供电系统将会出现无电源可供的事故。因为，此时 ATSE 的控制器检测不到任何信号，

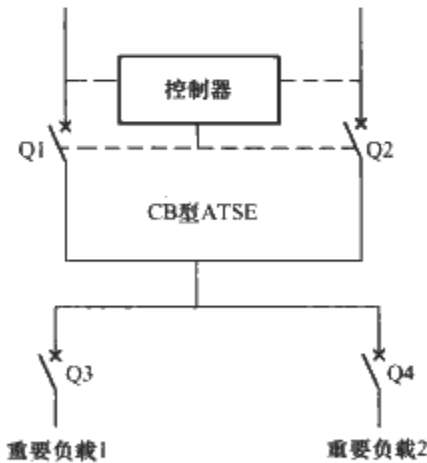


图 2.6-22 CB 型 ATSE 应用的典型电路

故不会发出动作指令，所以，ATSE 的另一台断路器（Q2）不会闭合，主电路将处于无电源状态，使负载 2 无法正常工作，这有悖于安装 ATSE 目的。所以，使用 CB 型 ATSE 必须注意上下级断路器的过电流保护配合问题。

为了有利于 Q1、Q3 保护特性的配合，Q1、Q3 最好为同一品牌的产品，并且应经过 GB 14048.2 中附录 A（断路器与串联在同一电路中的另一台短路保护装置在短路条件下的配合）规定的验证，才能确保安全使用。

5.2.2 由小型断路器（MCB）派生的 CB 型 ATSE 的选择要点

小型断路器（MCB）一般符合 GB 10963.1—2005《电气附件 家用及类似场所用过电流保护断路器 第 1 部分：用于交流的断路器》。该标准规定 MCB 预期使用在污染等级 2 的环境中，而 ATSE 要求的预期使用环境为污染等级 3。因此，MCB 派生 ATSE 后应按照 GB 14048.1 要求来验证其电气间隙和爬电距离，这样使用才能更安全。

MCB 主要作为线路保护的断路器，它的瞬时脱扣器分 B 型、C 型、D 型。瞬时脱扣范围见表 2.6-9（见 GB 10963.1 中的表 2）。当由 MCB 派生的 CB 型 ATSE 用于电动机线路末端时，应注意电动机的起动电流与 MCB 脱扣器瞬时动作值之间的配合。防止因起动电动机引起 MCB 脱扣，造成 ATSE 断电事故的发生。

表 2.6-9 MCB 瞬时脱扣范围

脱扣形式	脱扣范围
B	$>(3\sim5)I_N$
C	$>(5\sim10)I_N$
D	$>(10\sim20)I_N^{\text{①}}$

① 对特定场合，也可以使用至 $50I_N$ 。

5.3 由接触器派生的 ATSE 选用要点

依据 GB 14048.4 的规定，接触器短路试验后允许其触头熔焊。实际中的接触器受短路电流冲击后触头很难做到不熔焊。因此，选择由接触器派生的 ATSE 必须注意“触头发生熔焊后，ATSE 将不能转换”的现象。

5.4 消防泵控制器中选用 ATSE 的原则

根据 GB/T 21208—2007《低压开关设备和控制设备 固定式消防泵驱动器的控制器》（IEC/TS 62091：2003，MOD）的规定，用于消防泵控制器中的 ATSE 应具有以下特性：

- (1) ATSE 应能电气操作并以机械方式保持在适当位置。
- (2) ATSE 应符合 GB 14048.11 中 PC 型 ATSE 的要求，其操动机构应能保证负载电路不会长时间的与常用电源或备用电源断开。

根据以上的定义消防系统所用的 ATSE 应是：PC 型的、具有机械保持的、二位置式的。

第7章 低压开关、隔离器、隔离开关、熔断器组合电器

1 产品分类与用途

1.1 用途

低压开关、隔离器、隔离开关和熔断器组合电器可用于额定电压交流不超过 1000V 或直流不超过 1500V 的配电电路和电动机电路中。

上述开关和熔断器组合电器供不频繁的手动（或电动）接通和分断正常电路条件下的负载电流，也可用作起动、加速和（或）停止单台电动机。

在断开状态下能符合规定隔离功能要求的隔离器、隔离开关和熔断器组合电器可作为电源隔离之用。

1.2 定义

1.2.1 （机械）开关 switch (mechanical)

在正常电路条件下（包括规定的过载工作条件），能够接通、承载和分断电流，并在规定的非正常电路条件下（例如短路），能在规定时间内承载电流的一种机械开关电器。

开关可以接通但不能分断短路电流。

1.2.2 隔离器 disconnecter

在断开状态下能符合规定的隔离功能要求的机械开关电器。

如分断或接通的电流可忽略，或隔离器的每一极的接线端子的电压无明显变化时，隔离器能够断开和闭合电路。隔离器能承载正常电路条件下的电流，也能在一定时间内承载非正常电路条件下的电流（短路电流）。

1.2.3 隔离开关 switch-disconnector

在断开状态下能符合隔离器的隔离要求的开关。

1.2.4 熔断器组合电器 fuse-combination unit

由制造厂或按其说明书将机械开关电器与一个或数个熔断器组装在同一个单元内的组合电器。

熔断器组合电器是对熔断器开关电器的总称。

1.2.5 开关熔断器组 switch-fuse

开关的一极或多极与熔断器串联构成的组合电器。

1.2.6 熔断器式开关 fuse-switch

用熔断体或带有熔断体载熔件作为动触头的一种开关。

1.2.7 隔离器熔断器组 disconnecter-fuse

隔离器的一极或多极与熔断器串联构成的组合电器。

1.2.8 熔断器式隔离器 fuse-disconnector

用熔断体或带有熔断体的载熔件作为动触头的一种隔离器。

1.2.9 隔离开关熔断器组 switch-disconnector-fuse

隔离开关的一极或多极与熔断器串联构成的组合电器。

1.2.10 熔断器式隔离开关 fuse-switch-disconnector

用熔断体或带有熔断体的载熔件作为动触头的一种隔离开关。

电器定义概要见表 2.7-1。

表 2.7-1 电器定义概要

功 能		
开 关	隔离器	隔离开关
开关熔断器组	隔离器熔断器组	隔离开关熔断器组
熔断器式开关	熔断器式隔离器	熔断器式隔离开关

注 1. 所有电器可以为单断点或多断点。
2. 图形符号根据出版物 GB/T 4728.7。
① 熔断器可接在电器的任一侧或接在电器触头间的一固定位置。

1.3 符合标准

产品符合 GB 14048.3—2002《低压开关设备和控制设备 第3部分：开关、隔离器、隔离开关及熔断器组合电器》及 IEC 60947-3《低压开关设备和控制设备 开关、隔离器、隔离开关及熔断器组合电器》。

1.4 产品分类

1.4.1 按照使用类别分

产品按照使用类别分类见表 2.7-2。

表 2.7-2 不同预定用途的产品使用类别

电流种类	使用类别		典 型 用 途
	类别 A	类别 B	
交流	AC-20A①	AC-20B①	在空载条件下闭合和断开
	AC-21A	AC-21B	通断电阻性负载，包括适当的过负载
	AC-22A	AC-22B	通断电阻和电感混合负载，包括适当的过负载
	AC-23A	AC-23B	通断电动机负载或其他高电感负载
直流	DC-20A①	DC-20B①	在空载条件下闭合和断开
	DC-21A	DC-21B	通断电阻性负载，包括适当的过负载
	DC-22A	DC-22B	通断电阻和电感混合负载，包括适当的过负载（如并励电动机）
	DC-23A	DC-23B	通断高电感负载（如串励电动机）

① 在美国不允许使用这类使用类别。
各种使用类别分别用额定工作电流的倍数、额定工作电压的倍数以及电路的功率因数或时间常数来表征其典型用途的特征。根据预定用途是否要求经常操作或不经常操作，使用类别符号用加尾标 A 或 B 来区别。
通常用作起动、加速和（或）停止单台电动机的电器，

其使用类别分类见表 2.7-3。

表 2.7-3 控制单台电动机用产品使用类别		
使用类别	典型用途	
交流	AC-2	绕线转子电动机：启动、反接制动与反向 ^① 、断开
	AC-3	笼型电动机：启动、运转中断开电动机
	AC-4	笼型电动机：启动、反接制动与反向 ^① 、密接通断 ^②
直流	DC-3	并励电动机：启动、反接制动与反向 ^① 、密接通断 ^② 、直流电动机的再生制动
	DC-5	串励电动机：启动、反接制动与反向 ^① 、密接通断 ^② 、直流电动机的再生制动

注 开闭转子电路、电容器和钨丝灯应遵照制造厂与用户间的特殊协定。

① 反接制动与反向，即电动机在旋转时用反接电动机定子绕组的方法使电动机快速停止或反向。

② 密接通断（点动），即在很短时间内一次或多次地接通电动机电源，使被电动机驱动的机构得到小的移动。

1.4.2 按照人力操作电器的方式分

(1) 有关人力操作。完全靠直接施加人力的一种操作，操作速度和操作力与操作者的动作有关。如 HD17S 中央手柄式隔离器见图 2.7-1。

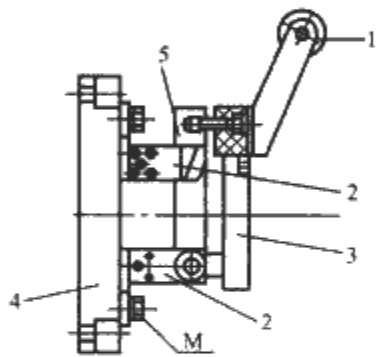


图 2.7-1 HD17S 中央手柄式隔离器
1—手柄；2—静插座；3—面罩；4—底板；5—动触刀

(2) 无关人力操作。能量来源于人力，并在一次连续操作中储存和释放能量的一种储能操作，操作速度和操作力与操作者的动力无关。例如不带保护装置而作开关用的万能式断路器。

(3) 半无关人力操作。完全靠直接施加达到某一阈值的人力的一种操作，所施人力超过阈值时，除非操作者故意延迟，否则将完成无关通断操作。例如 GL 隔离开关，见图 2.7-2。

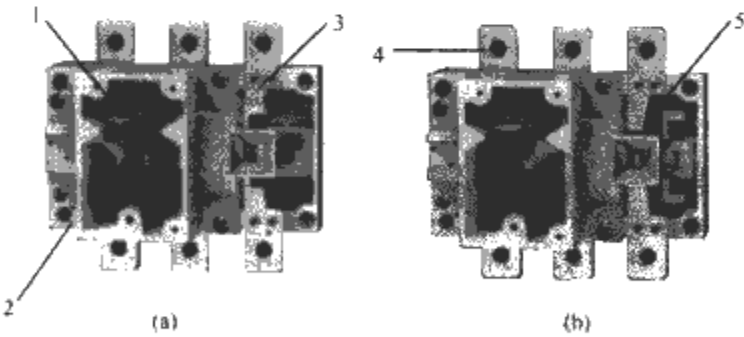


图 2.7-2 GL 隔离开关
(a) 开关在闭合位置；(b) 开关在断开位置
1—主轴；2—底座；3—静触头；4—进出线排；5—动触头组

2 结构特点及工作原理

2.1 低压隔离器结构特点及工作原理

低压隔离器的典型结构见图 2.7-1。静插座由导电材料制成，其外部由弹性材料夹紧，以确保动触刀插入时保持足够的接触压力。静插座固定在绝缘材料制成的底板上。动触刀与下静插座铰链连接，连接处一般采用碗形弹簧压紧而得

到必要的接触压力。绝缘手柄直接固定在绝缘面罩上。动触刀与绝缘面罩固定在一起。手动直接操作（推上或拉下）时，即能使电器在不带负载情况下闭合或断开。绝缘面罩的存在，确保在手动操作时操作人员不会触及导电件，提高其安全性。该结构的主触头位置明显可见，无需用其他方式指示，只要在结构上确保具有符合隔离功能安全要求的隔离距离，在线路与电源隔离以后，使检修人员安全地进行维护。因此是目前最简单的一种常用结构。因其价廉物美，深受用户青睐。

属于同一结构的隔离器还有多种操作方式供用户选用。图 2.7-3 所示为通过侧方正面的杠杆手动操作隔离器，图 2.7-4 所示为通过中央正面的杠杆手动操作隔离器。同样，把操作手柄推上（或拉下），通过杠杆传动，使动触刀插入（或拔出）静插座，完成电器在不带负载情况下的闭合（或断开）。图 2.7-5 所示为通过中央正面的手柄，用手旋转时（顺时针方向或逆时针方向）带动杠杆传动，使电器在不带负载情况下闭合或断开。

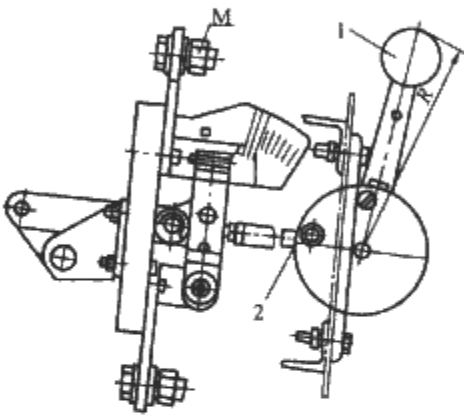


图 2.7-3 HD17S 侧方正面杠杆式隔离器
1—手柄；2—杠杆

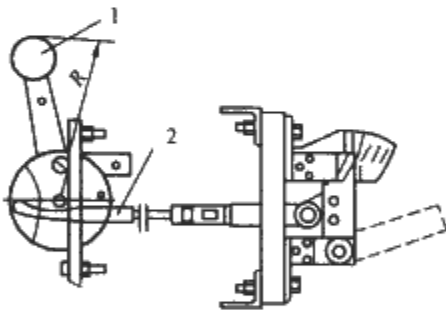


图 2.7-4 HD17S 中央正面杠杆式隔离器
1—手柄；2—杠杆

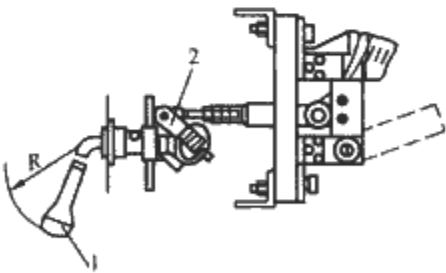


图 2.7-5 HD17S 中央正面旋转式隔离器
1—手柄；2—杠杆

此外，低压隔离器在配电电路中还可以用于电源转换隔离之用。在结构上应有三个静插座，动触刀与中间静插座转动连接，见图 2.7-6 和图 2.7-7。

低压隔离器若存在不安全因数，可危及操作人员的生命安全。因此在结构上应注意以下几点：

(1) 夹紧接线端子和导体使其就位或防止其松动的螺钉和螺母都不应作为固定任何其他零部件之用，以避免固定外

接导体时由于静插座固定松动而影响动触刀的接触可靠性。

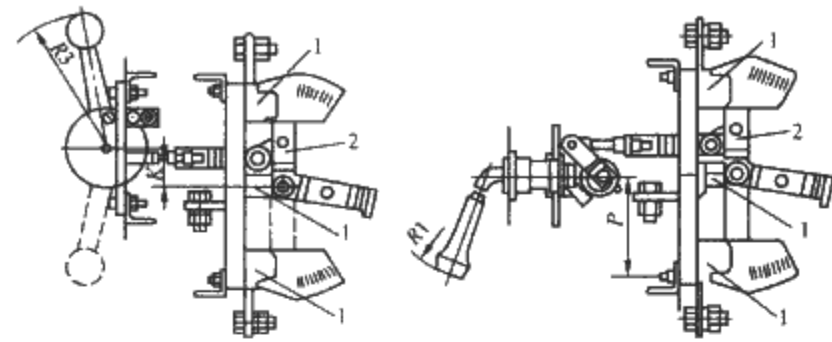


图 2.7-6 HS17S 中央正面 图 2.7-7 HS17S 中央正面旋
杆式转换隔离器 转式转换隔离器
1—静插座；2—动触刀 1—静插座；2—动触刀

- (2) 绝缘底板材料的选用应满足耐湿热性能的要求。
- (3) 导电回路结构应考虑提高动、热稳定性，又应尽量减少用铜量，降低成本。
- (4) 手柄操动结构应满足安全要求，如采用绝缘的手柄及面罩。

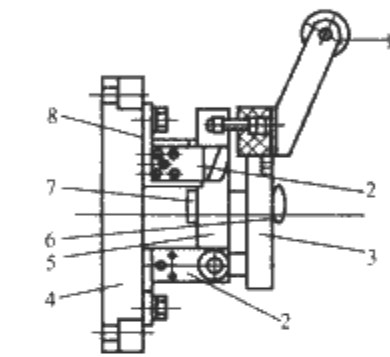


图 2.7-8 HD17H 中央
手柄式隔离器
1—手柄；2—静插座；3—面罩；
4—底板；5—动触刀；6—旋钮；
7—锁芯；8—锁座

(5) 对于额定短时耐受电流值较高的产品，可采用增加机械联锁的办法提高其安全性。如图 2.7-8 所示，手动闭合后，面罩上的旋扭转一下，就使固定在隔离器的面罩上锁芯的顶杆滑出，插入固定在底板上锁座的孔中，达到动触刀和静插座之间的机械联锁。因此当产品在规定的额定短时耐受电流流过时，能抗衡由大电流产生的特大电动斥力，提高了安全性。

低压隔离器用于低压配电电路中，常常用作电源的隔离之用，以便在维修电气设备时确保人身安全。为了避免人为过错，确保隔离器不带负载操作，在设计配电电路时，可选用带辅助开关的隔离器，以便可以与供电电路中相应的接触器或断路器有电气联锁，确保负载由接触器或断路器分断。

若隔离器提供辅助开关与接触器或断路器电气联锁，则辅助开关除应符合 GB 14048.5—2001《低压开关设备和控制设备第 5-1 部分：控制电路电器和开关元件机电式控制电路电器》标准有关规定外，还应满足其触头和主极的触头断开之间的时间间隔不小于 20ms，以确保在隔离器的主极的触头断开之前有关的接触器或断路器断开电流。同时，在接通操作时，辅助开关的触头应在主极的触头接通同时或之后接通。

虽然在结构上采取上述措施，为了人身安全，有关标准在产品的标志规定上，特别强调应在产品安装后从正面明显易见的地方标明“不能带负载操作”，除非该隔离器设有防止带负载操作的联锁。

低压隔离器的操作方式大部分为手动操作，这样制造成本较低。对于大容量的低压隔离器考虑到操作力较大，制造厂也研发了电动操作的低压隔离器，图 2.7-9 为 HD18 系列电动操作低压隔离器结构示意图，额定工作电流为 4000A（或 2500A），采用组合式结构，动、静触头采用双断点对接式接触，静触头为矩形，中间为空心并带有散热片，由精密铸造而成。主触头的分合是通过操作手柄带动凸轮、导向

件、摇臂、转轴来完成，并以“O”和“I”来表示分合指示。操作手柄有锁扣机构。动力操作时，电动机和控制箱通过锁扣机构使手柄转动，从而达到触头分合的目的。可带三动合、三动断辅助触头。

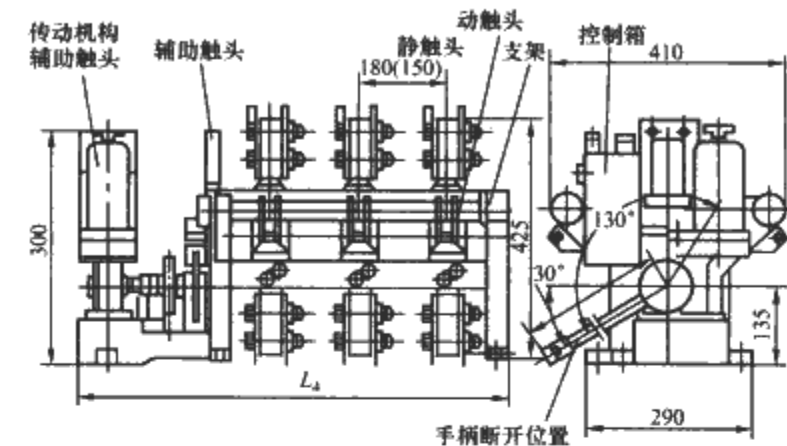


图 2.7-9 HD18 系列电动操作低压隔离器

2.2 低压开关结构特点及工作原理

由于低压开关在正常电路条件下可以接通和分断电流，因此在结构上往往均具备两个特点：带灭弧室及快速合闸和断开。在额定工作电流值较小时也有不带灭弧室。图 2.7-10 所示为组合开关外形图。该组合开关是由若干动触头及静触头（刀片）配对分别装于数层绝缘件内，动触头装在附有手柄的转轴上，随转轴旋转而变更其合闸或断开位置。在结构上不带灭弧室。在其顶盖部分有由滑板、凸轮、扭簧及手柄等零件构成的操动机构，该机构由于采用了扭簧储能，可使所施人力超过阈值时，开关快速合闸或断开，从而使触头合闸或断开的速度与手柄旋转速度无关。其接线端子可板前接线，也可板后接线。

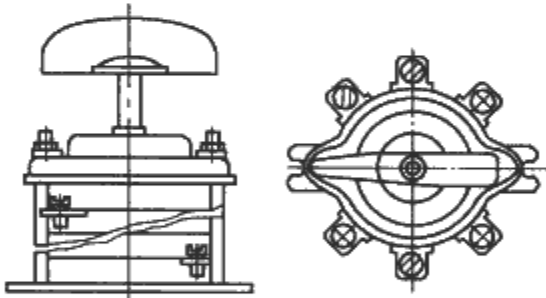


图 2.7-10 组合开关外形

按组合开关的接线图接线。可分别达到数层同时接通或交替接通；中间有零位或两位转换；中间无零位；三位转换或四位转换；测量三相电压或三相四线电压；换接两电阻单接、串联、并联用；控制小型笼型电动机正反转用或用作 Y—△ 起动器。

图 2.7-11 为 HX1 正面旋转手柄操动开关的外形。由正面操作旋转手柄使主轴转动，同时带动机构弹簧压缩。当主轴按逆时针方向转动时，一旦超过设计的阈值，开关快速合闸。反之，当主轴按顺时针方向转动时，一旦超过设计的阈值，开关快速断开。开关本体见图 2.7-12。开关的触头系统

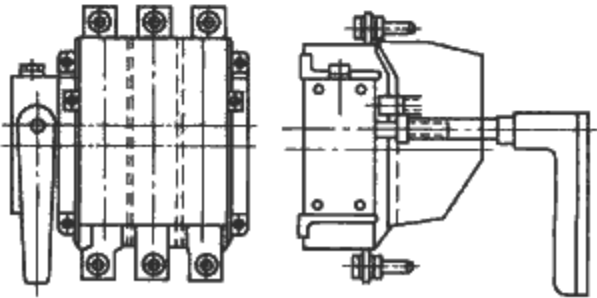


图 2.7-11 HX1 正面旋转手柄操动开关外形

采用对接式动触头与静触头配对，并有主触头和弧触头两挡触头并联。其额定工作电流值可设计得较大。为满足接通和分断较大电流，也设有去离子栅灭弧室，与弧触头配合帮助熄灭电弧。因此可分断 $(2.5\sim 6)I_N$ 的电流。该开关可带有防护外盖。操动机构装于开关左面，手柄轴可从开关柜的正面伸出，便于用户在柜外正面操作。

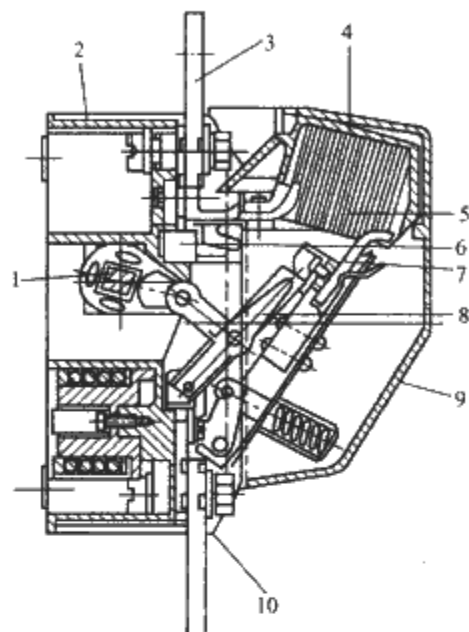


图 2.7-12 HX1 正面旋转手柄操动的开关本体
1—主轴；2—底座；3—上端子；4—灭弧室；5—静弧触头；6—静主触头；7—动弧触头；8—动主触头；9—防护外壳

2.3 低压隔离开关结构特点及工作原理

低压隔离开关既具有低压隔离器的功能，又具有低压开关的功能，因此在结构设计上具有上述两者的结构特点。图 2.7-2 为一种典型的低压隔离开关。其操动机构为半无关人力操作。如图 2.7-2 (a) 操作主轴 1 反时针旋转时，使弹簧压缩，当达到某一阈值时，除非操作者手握操作手柄不令其主轴 1 转动，否则在弹簧蓄能后瞬时释放使主轴 1 快速转动，至 90° 位置带动动触头组向右移动。该产品的动触头为一组上下并联的双断点触头，由铜镀银材料制成，三个极的动触头均安装在由绝缘材料制成的触头支架上，由此构成动触头组。静触头 3 与进出线排 4 为一体的铜镀银导电排。当动触头组在图 2.7-2 (a) 状态时，静触头 3 导电排刚好插入上下并联的触头之中，使上下进出线接通。当动触头组向右移动时，上下并联的触头从静触头 3 导电排中拔出，从而使上下进出线断开，见图 2.7-2 (b)。

产品的底座及外壳由玻璃纤维增强的不饱和聚酯树脂制造，具有良好的阻燃性能、介电性能，且具有抗碳化性和抗冲击性。采用上述操动机构实现快速接通或分断（速度可达 13.8m/s ），大大地提高了电器的接通分断能力。在分断位置，动静主触头之间的距离能满足隔离距离的要求，并且外壳正面的位置孔中清晰地显示“ I ”（闭合）或“ O ”（断开）指示。因此具有安全可靠的隔离功能。

此外，在隔离位置也可采用安装专用挂锁的联锁装置，操作操作手柄时，即使稍有一点松动，断开触头之间的电气间隙应能满足有关标准的规定。上述的低压隔离开关在“ O ”位时，就可以同时用三把锁锁住手柄。如图 2.7-13 所示，在操作手柄中间有一块锁板，拔出锁板再用挂锁穿过，使其不能复位，操作手柄就被卡住而不能转动。在供电电路的电气设备进行检修维护时，除了配电中心负责人掌握一把钥匙外，相应的维修操作工也掌握另外的几把，就可避免人

为地误操作而造成人身伤害事故，使供电更为安全可靠。

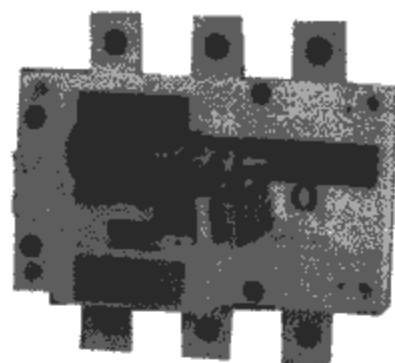


图 2.7-13 带挂锁的 GL 隔离开关

2.4 低压隔离器熔断器组结构特点及工作原理

低压隔离器熔断器组产品是结构上把低压隔离器与熔断器串联组成一整体，由熔断器承担分断短路电流的能力。目前市场上很少有此产品，应用较少，故不作详细介绍。

2.5 低压开关熔断器组结构特点及工作原理

低压开关熔断器组产品是结构上把低压开关与熔断器串联组成一整体，除了具有低压开关的功能外，分断短路电流可由熔断器来承担。图 2.7-14 是 OESA PL 低压开关熔断器组。面罩取下即可见熔体，可方便更换，见图 2.7-14 (b)。在电器下部为开关，外壳采用绝缘性能良好的可回收塑料制成，触头系统带栅片灭弧室，主触头合分时具有自清洁功能，如图 2.7-15 所示。操作手柄转动 90° 时，操动机构 [见图 2.7-14 (a)] 使触头快速合闸或分闸，并与操作者动作无关。此外，操动机构安装多样化，可安装在电器的一端、极间或侧面如图 2.7-16 所示，以方便各种不同用户需要。

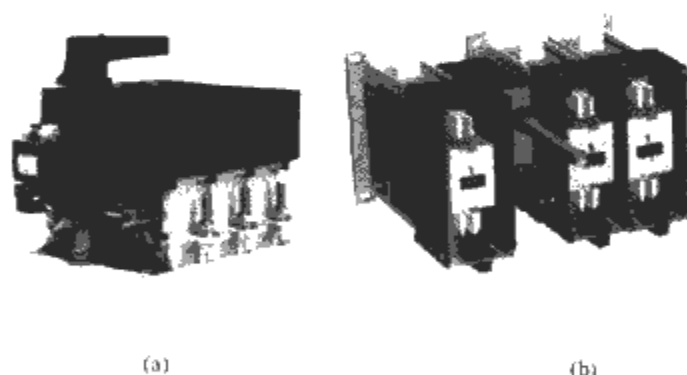


图 2.7-14 PL 低压开关熔断器组
(a) 侧视图；(b) 俯视图

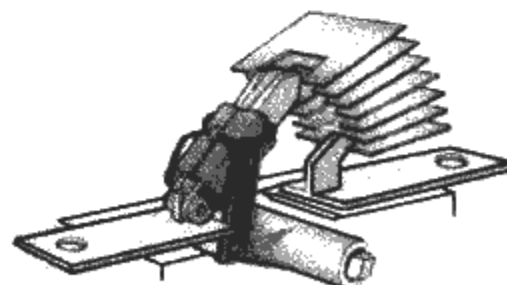


图 2.7-15 自清洁触头

选用的熔断器的型式、额定值与特性应符合熔断器国家标准的有关规定，并满足选择性保护的要求。一般应确保 $1.6I_{dc}$ 或 $1.6I_{th}$ 时持续 1h 不熔断。选择低截断电流和能量的标准化熔体可使小规格的接触器和过载继电器可用于“2”

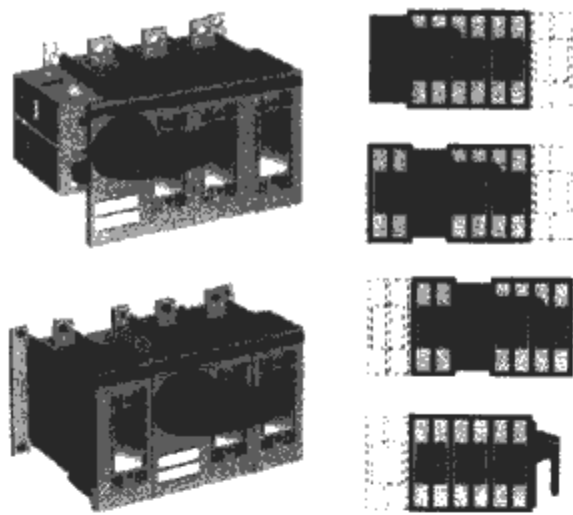


图 2.7-16 操动机构多种安装方式

型协调配合的电动机保护式起动器。因此，在设计电动机起动装置时，既能降低成本，又能减少占用空间。

此外，该产品可以装上各种附件，以满足不同用户的需求。图 2.7-17 所示为带电动机操作器的 PL 低压开关熔断器组，可进行远距离控制开关之用。对于电动机操作器的安装方式也可以根据用户需要，有门上安装、门后安装、开关上安装和嵌入安装四种安装方式，见图 2.7-18。

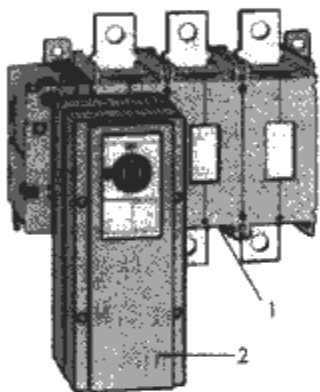


图 2.7-17 带电动机操作器的 PL 低压开关熔断器组
1—开关熔断器组；2—电动机操作器

在开关的侧面及操动机构上可安装若干个辅助触头供用户作电气联锁之用，见图 2.7-19。通过机构转轴即可带动辅助触头改变合分位置。

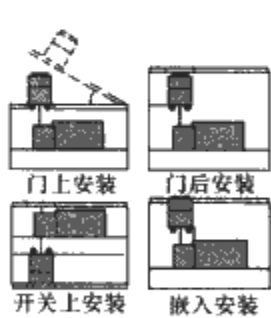


图 2.7-18 电动机操作器的各种安装方式

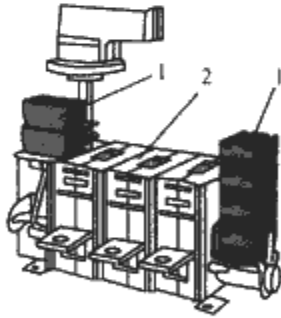


图 2.7-19 带辅助触头的 PL 低压开关熔断器组
1—辅助触头；2—开关熔断器组

操作手柄也有手枪式，见图 2.7-20。其特点是：具备标准的 IP65 保护等级；与柜门联锁（即 OFF 位置上，柜门才能打开）；可用 3 把挂锁锁住手柄。此外，为满足互为备用的两路供电要求，可提供简便结构的机械联锁装置。图 2.7-21 即表示两台产品的主轴上套上平板联锁杠杆后，即可确保两台产品中只有一台可以进行合闸操作。当一台合闸时，另一台的主轴被联锁杠杆拖住而不能转动。



图 2.7-20 手枪式手柄



图 2.7-21 机械联锁

2.6 低压隔离开关熔断器组结构特点及工作原理

低压隔离开关熔断器组产品是结构上把低压隔离开关与熔断器组串联成一体，除了具有低压隔离开关的功能外，分断短路电流可由熔断器来承担。

图 2.7-22 为 QSA 低压隔离开关熔断器组。下部为低压隔离开关，由底座、上盖、静触刀、动触头系统等组成。底座及上盖均由玻璃纤维增强的不饱和聚酯树脂制造。底座上安装与进出线排相连的静触刀，上盖上安装与熔断器座相连的静触刀。当操作手柄 4 旋转 90°时，如图 2.7-23 所示，需首先压缩压簧，达到某一阈值时（即过死点），操动机构使滑架 3 快速向左或右移动，带动动触头快速左移或右移。每一极的动触头系统是由 2~4 个压缩弹簧和两两配对的镀银的铜滚柱组成，滚柱借助于钢质卡箍定位，每个滚柱都可以单独滚动。当动触头快速左移或右移时，每对铜滚柱正好被上下两静触刀插入或拔出，从而完成合闸或断开的操作。由于正常操作时，每对滚柱与触刀之间发生滚动，使触头表面的焊点得以清除，防止重复熔焊而影响使用。

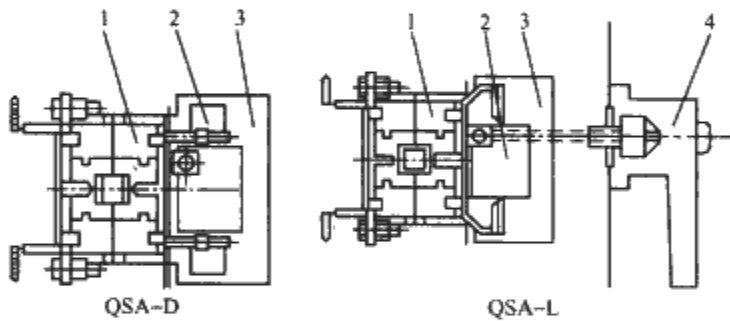


图 2.7-22 QSA 低压隔离开关熔断器组
1—低压隔离开关；2—熔断体；3—相间隔板；4—操作手柄

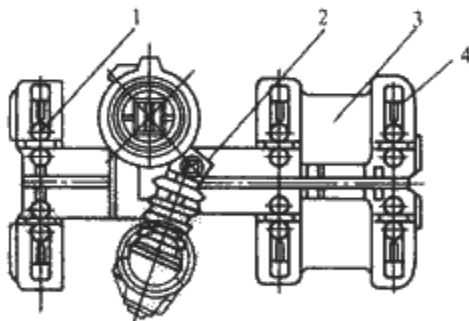


图 2.7-23 QSA 动触头系统
1—动触头；2—机构；3—滑架；4—触头弹簧

电器的上部为熔断体 2，与上盖的静触刀相连有两种方式：其一为熔断器插座与静触刀相连，熔断体采用插入式安装（如 QSA-D）；其二为熔断器安装架与静触刀相连，熔断体采用固定式安装（如 QSA-L）。

该电器在断开位置时，隔离距离较大，能满足隔离功能的有关要求。而且合闸和断开速度较快，有利于在正常及过载情况下接通和分断电流，具备隔离开关功能。上述产品若在熔断器插座或安装架上直接插入或直接固定相应铜排，该产品即为 QA 及 QP 隔离开关。

由于上述隔离电器的主触头在断开位置不能清晰可见,而是用固定在操动器上的指示器来作为主触头隔离位置的指示,因而操动机构的强度和断开位置指示的可靠性必须进行检验。此外,若制造厂提供的操作手柄上带锁扣机构时,应确保只有当主触头均处于断开位置时才能锁扣。同时同一极的断开触头的间隙均不小于标准规定的最小电气间隙,并能承受相应的额定冲击耐受电压的试验。

2.7 低压熔断器式隔离器结构特点及工作原理

低压熔断器式隔离器的结构是把熔断体作为隔离器的动触头的一种隔离器。图 2.7-24 是一种轨道安装模数化的熔断器式隔离器。为与终端电器配套,其绝缘外壳的外形与小型断路器相似。该产品由底座、手柄、导电片、插板、弹簧等组成,并选配 RT14 圆管式熔断体放置在手柄内,随即与手柄中的导电片相连接。当手柄向前推入而转动时,作为隔离器相线的动触头与插板相连接,使其处于合闸位置。若用手向外拉动拉杆时,手柄向外转动,随之带动作为隔离器相线的动触头处于分闸位置。由于此时熔断体与上下进出线端子均脱离,可以很安全可靠地按需要更换熔断体。该产品体积小,分合速度完全取决于人为操作速度,并且由于在结构上没有采取熄弧措施,因而不能带负载操作。但在分闸位置时能满足隔离距离要求。因此产品主要用于配电电路和电动机电路中作电源隔离并作线路过载和短路保护之用。

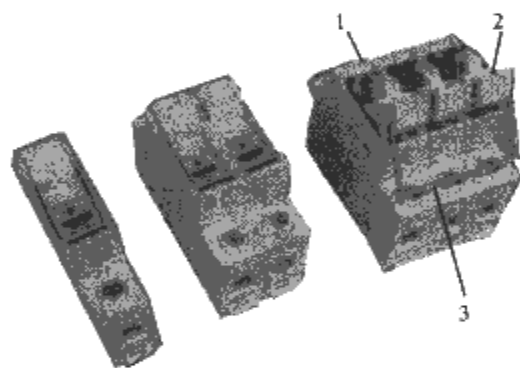


图 2.7-24 HG30 熔断器式隔离器
1—底座；2—手柄；3—拉杆

该产品上装有由氖灯和电阻组成的熔断体熔断信号装置,当产品在正常条件下使用时,指示灯(氖灯)暗,若熔断体熔断时,则指示灯亮,很醒目地提醒用户更换熔断体。

该产品有单极、单极二线、二极、三极、三极四线各种品种,可以满足终端供电各种用户需要。

2.8 低压熔断器式开关结构特点及工作原理

低压熔断器式开关是把熔断体作为开关的动触头的一种组合电器。图 2.7-25 为 HR3 熔断器式开关。额定电流 600A 及以下的规格带有安全挡板,并装有由酚醛布板和钢板冲制件铆合而成的灭弧室。熔断体固定在带弹簧、锁板的绝缘横梁上。操作手柄 4 向上推时,通过机构 5 的杠杆连动,使熔断体下沉,熔断体两头的触刀正好插入与进出线排 3 相连的插座中。反之亦然。在电路正常供电时,由熔断体的触刀承担接通和分断电源。当线路或用电设备过载或短路时,熔断体熔断,及时切断过电流。若需更换熔断体只要按下锁板即能方便完成。该产品在分闸位置电气间隙较小,一般不作隔离之用,使用中若需检修输出端电气设备,应拔出熔断体后再进行,可确保安全。操作方式有前面操作及侧面操作,分别可用于配电屏及动力配电箱。

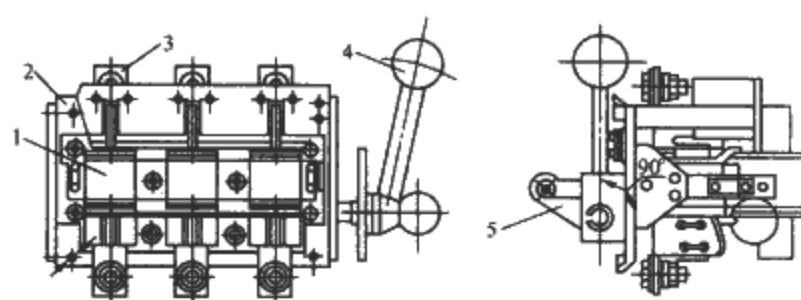


图 2.7-25 HR3 熔断器式开关

1—熔断体；2—底板；3—进出线排；4—手柄；5—机构

2.9 低压熔断器式隔离开关结构特点及工作原理

低压熔断器式隔离开关是把熔断体作为隔离开关的动触头的一种组合电器。由于其功能较齐全,体积较小,目前发展的品种较多。图 2.7-26 为 BMH1 熔断器式隔离开关(固定式)的结构图。整个外壳均采用高强度阻燃材料模压而成,具有良好的绝缘防护性能。操作手柄 1 在盖 2 的上方,使用安全可靠。盖上有透明面板 3,可以观察内部工作状态,并可方便取下。熔断体 4 挂在盖上,更换方便简单。操作手柄向上推时,熔断体两端的刀形导电板很方便地插入插座。当隔离开关带负荷断开时,产生的电弧将很快转移到引弧角上,并顺利进入灭弧室,保证其可靠分断,同时提高了带电操作循环次数。

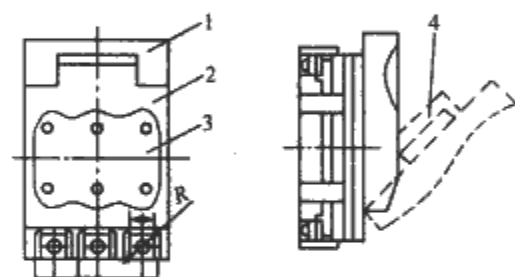


图 2.7-26 BMH1 熔断器式隔离开关(固定式)

1—操作手柄；2—盖；3—透明面板；4—熔断体

该产品性能优良,外形美观,深受用户欢迎,主要用于高短路电流的配电电路和电动机电路中,用作电源供电及隔离之用。该产品若采用隔离刀代替熔断体时,可以仅作为隔离开关来使用。

该产品的安装方式除固定式外,还有挂接式安装结构,如图 2.7-27 所示 BMH1 熔断器式隔离开关直接挂在三相母线上,电源自横向安装的标准排经过产品底部直接引入进线端。如有需要,可以整体快速更换,简单又方便。由于各组件的设计采用插接组合式结构,也可部分更换损坏的组件进行维护检修。

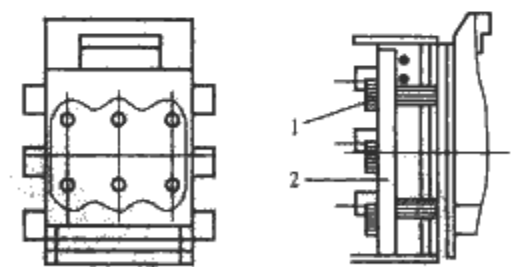


图 2.7-27 BMH1 熔断器式隔离开关(挂接式)

1—母排；2—隔离开关

除了三极传统的并列布置结构外,近期又发展一种条形布置的结构。图 2.7-28 为 BMH1 熔断器式隔离开关,由图 2.7-28 (a) 可知,三个极上下串列布置,使电器的宽度缩小为原有的 1/3。图 2.7-28 (b) 为其外形图。图 2.7-29 为熔断器式隔离开关安装的示意图,隔离开关均可方便地安装

在不打孔的通用母线系统中，可以按需要上出线或下出线。由此可见，宽度的减少就可以在同样的配电柜中增加供电的回路数，节约设备投资。

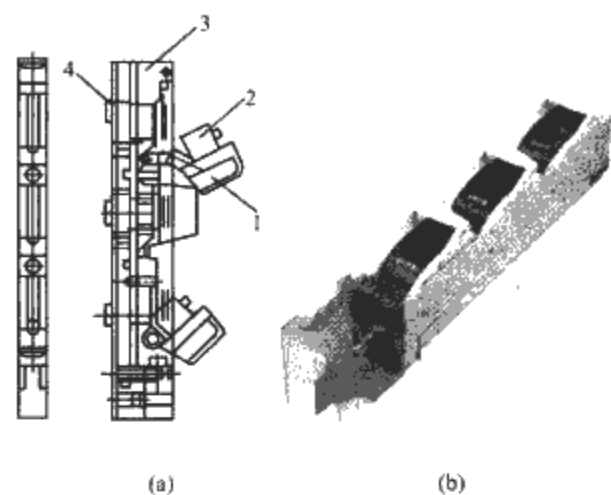


图 2.7-28 BMH1 熔断器式隔离开关
(条形) 每相单独操作
(a) 结构；(b) 外形
1—透明盖；2—熔断体；3—底座；4—通用母线

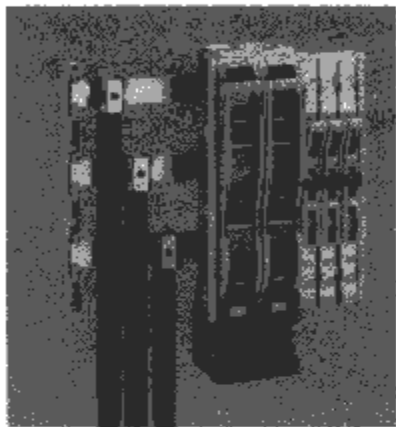


图 2.7-29 熔断器式隔离开关安装示意图

该产品为绝缘全封闭式结构，整个外壳均采用高强度阻燃材料模压制造而成，具有良好的绝缘防护性能。每个极均单独成组件。熔断体 2 装于透明盖 1 上，推上此盖或拔出此盖即可使熔断体两端的刀形导电板很方便地插入或拔出插座。操作时需每相单独操作，若带负荷操作，产生的电弧将会很快转移到引弧角上，并顺利进入灭弧室，既减少接触面的烧损，提高了带电操作循环次数，又确保其可靠分断。盖上有透明面板，可以方便地观察到内部工作状态。盖也能方便取下，以便更换熔断体。当处于断开位置时，可以看到明显断口，增加了维护检修人员的安全感。

除了每相单独操作的条形三相熔断器式隔离开关外，也有三相同时操作的条形三相熔断器式隔离开关，见图 2.7-30，其中图 2.7-30 (b) 为其外形图。由图可见，操作手柄 1 通

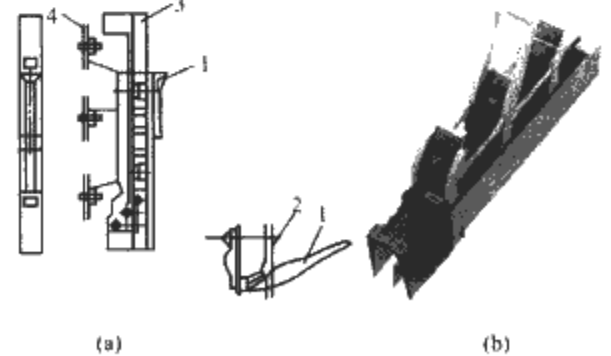


图 2.7-30 BMH1 熔断器式隔离开关 (条形)
三相同时操作
(a) 结构；(b) 外形
1—手柄；2—连杆；3—底座；4—通用母线

过连杆带动三个极的透明盖同时动作，从而达到三相同时操作的目的。

产品的安装方式也有两种：图 2.7-30 所示的为固定式安装，图 2.7-28 的为挂接式安装。在使用中，电流互感器也可完全置于该隔离开关的底座中，而不占用外部空间。此外，近期又研发了电子熔丝监测器装于该产品，更可直观又方便地监测到熔断体是否熔断。避免了由于单相熔断而引起的设备故障。

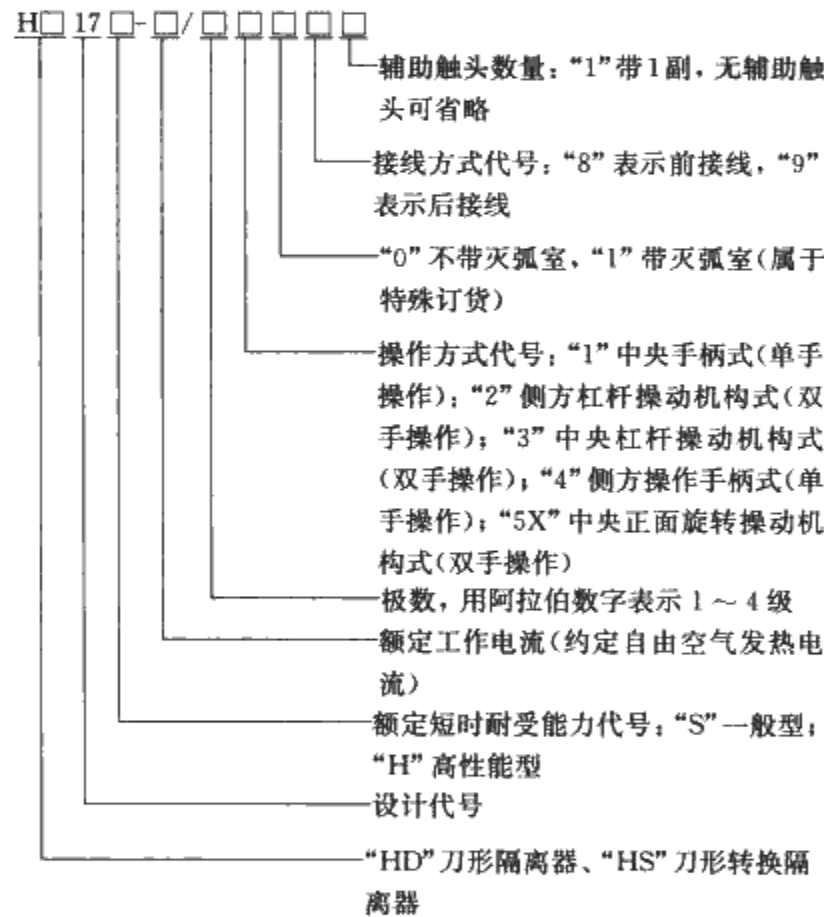
3 产品技术参数与性能

低压开关、隔离器、隔离开关和熔断器组合电器的生产企业主要有苏州燎原电器厂、厦门联容电控有限公司、北京明日电器设备有限公司、上海电器陶瓷厂有限公司、ABB (中国) 有限公司及宁波燎原电器厂等。下面就上述企业的典型产品做一些介绍。

3.1 低压隔离器典型产品技术参数与性能

3.1.1 HD17S (H) 系列刀形隔离器和 HS17S 刀形转换隔离器

该产品为目前最常用并符合 GB 14048.3 的产品。其型号及含义如下：



- (1) HD17S (H) 系列技术参数与性能：
- 1) 额定工作电压：交流 690V 或 400V 及以下，直流 230V 及以下。
 - 2) 使用类别：AC-20、DC-20。
 - 3) 额定短时耐受电流 (1s) 值见表 2.7-4。

表 2.7-4 HD17S (H) 额定短时耐受电流				
额定工作 电流 (A)	HD17S (kA)			HD17H (kA)
	3108	3318/4318	35X18/45X18	3318/4318, 35X18/45X8
200	10	12	12	15
400	15	20	20	30
630	20	25	25	30
1000	25	30	30	50
1600	30	35	35	50
2000	—	35	35	50

产品的外形尺寸见表 2.7-5~表 2.7-7 及图 2.7-1、图 2.7-3~图 2.7-5 和图 2.7-8。同类型的产品型号有 BHD17S 系列刀形隔离器。

(2) HS17S 系列技术参数与性能:

1) 额定工作电压: 交流 690V、400V 及以下, 直流 230V 及以下。

2) 使用类别: AC-20, DC-20。

3) 额定短时耐受电流 (1s) 值见表 2.7-8, 产品的外形尺寸见表 2.7-9 及图 2.7-6 和图 2.7-7。

表 2.7-5 HD17S (H) 单手操作产品外形尺寸 mm			
规 格	宽	高	深
200/3108	190	205	158
400/3108	220	245	170
630/3108	300	290	168
1000/3108	355	295	185
1600/3108	365	340	205

表 2.7-6 HD17S (H) 双手操作产品外形尺寸 mm			
规 格	宽	高	深
200/3318	210	180	159.5
400/3318	240	206	184
630/3318	260	300	189
1000/3318	312	320	226
1600/3308	338	360	233
2000/3308	415	450	275

表 2.7-7 HD17S (H) 中央正面旋转操动机构产品外形尺寸 mm			
规 格	宽	高	深
200/35X18	210	180	159.5
400/35X18	240	206	180
630/35X18	260	300	189
1000/35X18	312	320	226
1600/35X08	338	360	233
2000/35X08	415	450	275

表 2.7-8 HS17 系列额定短时耐受电流				
额定工作电流 (A)	HS17S (kA)			HS17H (kA)
	3318/35X18 4318/45X18	3308/35X08	4308/45X18	4318/45X18
200	12	—	—	15
400	20	—	—	30
630	25	—	—	30
1000	30	—	—	50
1600	—	35	35	50
2000	—	35	35	50
2500	—	35	—	—

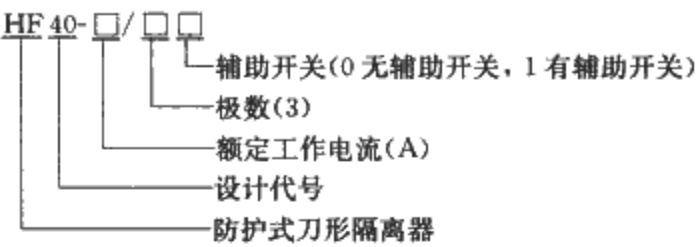
表 2.7-9 HS17S 产品外形尺寸 mm			
规 格	宽	高	深
200/3318 (35X18)	210	260	160
400/3318 (35X18)	240	298	184
630/3318 (35X18)	260	400	189
1000/3318 (35X18)	312	440	228
1600/3308 (35X08)	370	490	240
2000/3308 (35X08)	400	570	265
2500/3308 (35X08)	600	530	240

3.1.2 HF40 系列防护式刀形隔离器

额定工作电压: 交流 380V, 直流 220V。

使用类别: AC-20B, DC-20B。

型号及其含义如下:



该产品的特点是导电部件均在绝缘外壳内, 提高了对人身安全的防护性能, 防止操作时误触导电部分。产品的额定短时耐受电流 (1s) 值见表 2.7-10, 产品的外形尺寸见表 2.7-11。

表 2.7-10 HF40 系列防护式刀形隔离器 额定短时耐受电流		
额定工作电流 (A)	额定绝缘电压 (V)	额定短时耐受电流 (kA)
100	500	2
200		4
400		8
630		12

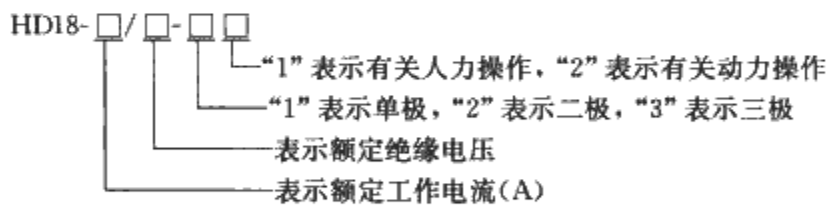
表 2.7-11 HF40 系列防护式刀形隔离器 产品外形尺寸 mm			
额定工作电流 (A)	宽	高	深
100	156	185	200
200	156	185	200
400	216	217.5	228
630	246	226	224

3.1.3 HD18 系列电动操作低压隔离器

额定工作电压: 交流 1200V, 直流 1500V (同额定绝缘电压)。

使用类别: AC-20B, DC-20B。

型号及其含义如下:



产品的主要技术性能见表 2.7-12, 外形尺寸见表 2.7-13 及图 2.7-9。

表 2.7-12 HD18 系列电动操作低压隔离器 主要技术性能					
额定工作电流 (交流、直流) (A)		2500/4000			
额定绝缘电压 (V)		直流 1500		交流 1200	
极数 (P)		1	2	3	
操作方式		手	电	手	电
1s 短时耐受电流 (kA)		50/80			
空载操作循环次数		1000			

表 2.7-13 HD18 系列电动操作低压隔离器外形尺寸 mm			
额定工作电流 (A)	L ₄		
	1 极	2 极	3 极
2500	445	605	745
3150			
4000	485	665	865

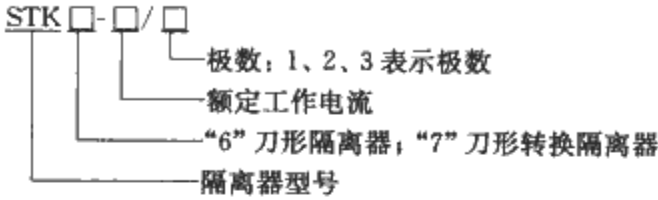
3.1.4 STK 系列刀形隔离器

该产品的特点是容量大，能满足冶金、电解、电镀、地铁、城市轨道交通、整流等设备的低压配电系统作电源隔离及转换隔离之用。

额定工作电压：交流 1000V，直流 1500V。

使用类别：AC-20A，DC-20A。

型号及其含义如下：



产品的主要技术性能见表 2.7-14。

表 2.7-14 STK 系列刀形隔离器主要技术性能

型 号		STK6	STK7
额定工作电压 (V)		交流：1000 直流：1500	
额定绝缘电压 (V)		1500	
额定工作电流 (A)		3150	4000
额定短时耐受电流持续时间 1s (kA)		63	64
机械寿命 (次)		8000	10 000
操作形式		电 动	
		板前手操作后检修	
辅助开关	电 压 (V)	380	
	电 流 (A)	5	
	动合、动断对数	3	4

产品的外形尺寸见图 2.7-31 和图 2.7-32。

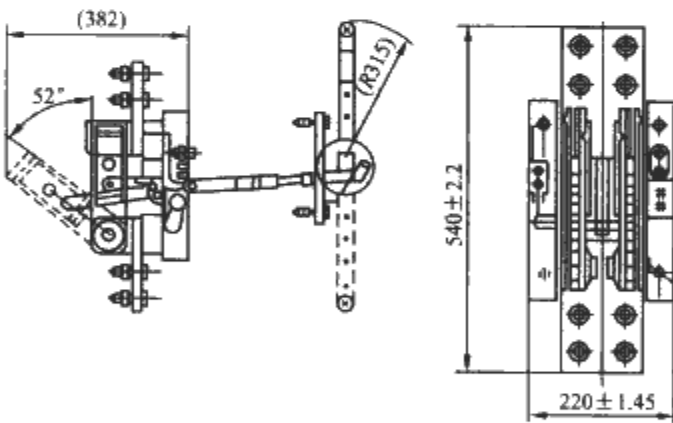


图 2.7-31 STK6 刀形隔离器

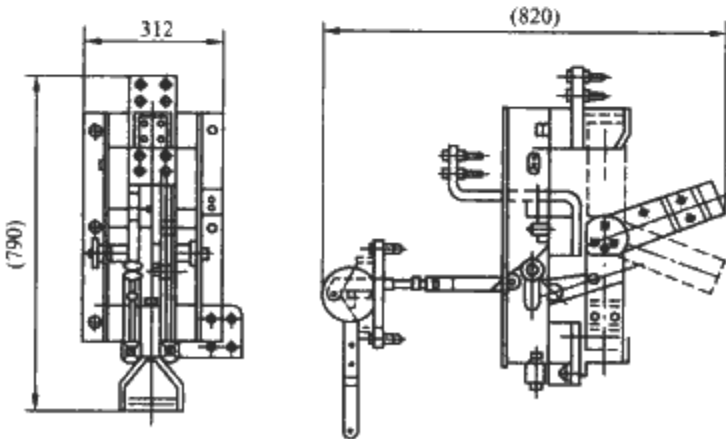


图 2.7-32 STK7 刀形转换隔离器

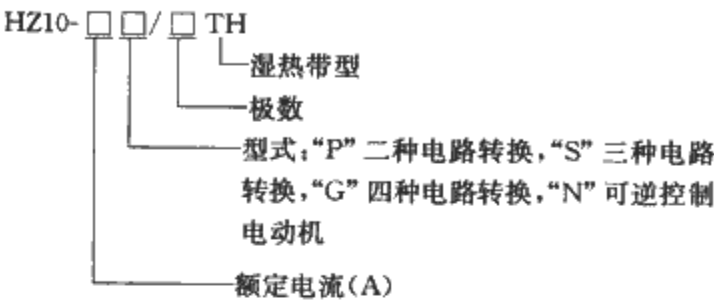
3.2 低压开关典型产品技术参数与性能

3.2.1 HZ10 系列组合开关

额定工作电压：交流 380V，直流 220V。

使用类别：AC-22A (10A、20A)，AC-21A (60A、100A)，DC-21A。

型号及其含义如下：



同类型的产品型号有 HZ10D 及电焊机专用的 HZ10D-□/E119 及 KDH 系列。层数有 1~6 层。

产品的主要技术性能见表 2.7-15。

产品的外形尺寸见表 2.7-16 及图 2.7-10。

表 2.7-15 HZ10 系列组合开关主要技术性能

型 号		HZ10-10	HZ10-25	HZ10-60	HZ10-100
额定电压 (V)		AC 380, DC 220			
额定电流 (A)		10	25	60	100
电寿命 (次)	作配电电器用	10 000	15 000	10 000	5000
	作控制电动机用	5000		—	
控制电动机功率 (kW)	交流	2.2	4	—	—
	直流	0.6	1.1	—	—
通断能力	交流	5I _e	4I _e	2.5I _e	2.5I _e
	直流	1.5I _e			

表 2.7-16 HZ 系列组合开关产品外形尺寸 mm

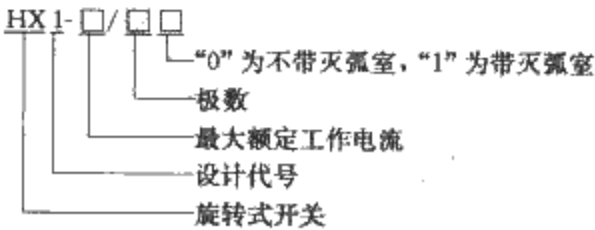
型号	宽	高	深 (1 层) / 每加 1 层增加数
HZ10-10	86	58	62/6
HZ10-25	114	92	88/10
HZ10-60	153	154	114/15
HZ10-100	153	170	118/17

3.2.2 HX1 系列旋转式开关

额定工作电压：交流 380V，660V。

额定绝缘电压：660V。

型号及其含义如下：



注意：不带灭弧室开关仅作隔离器适用。

产品主要技术性能及外形尺寸见表 2.7-17 和图 2.7-11。

表 2.7-17 HX1 系列旋转式开关主要技术性能及外形尺寸

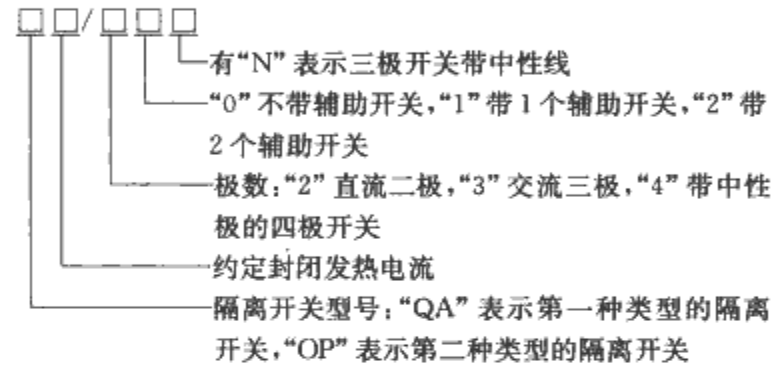
规格 (A)	额定工作电流 (A)								1s 额定短 时耐受电 流 (有效 值) (kA)	额定 短路 电流 (kA)	额定接通/分断能力				外形尺寸 (mm)			
	额定工作电压 380V				额定工作电压 660V						AC-21	AC-22	AC-23		高	宽	深	
	AC-20	AC-21	AC-22	AC-23	AC-20	AC-21	AC-22	AC-23					额定 工作 电流 100A	额定 工作 电流 100A				
250	250			200	250			100	8	50	1.5/ 1.5	3/3	10/8	8/6	202	197	256	
400	400			200	400		315	100							280	211		
630	630			315	630	—	—	—										12.6
1000	1000	—		—	1000	—	—	14	14						292			

注 飞弧距离为 50mm。

3.3 低压隔离开关典型产品技术参数与性能

3.3.1 QA 隔离开关

额定工作电压(V):交流 380,660,1000;直流 220,440。
额定绝缘电压 (V): 1000。
型号及其含义如下:



产品主要技术性能见表 2.7-18。直流开关的连接型式见图 2.7-33。

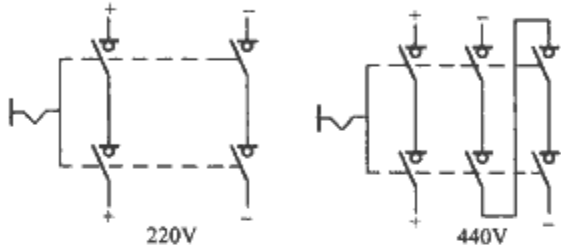


图 2.7-33 直流开关的连接型式

每相有四个并列触点,电动反力可缩小为接近原有的 1/16,使开关具有高的接通分断能力。
产品的外形尺寸见表 2.7-19,外貌见图 2.7-22。同类型产品型号有 HH15A 隔离开关。

3.3.2 QP 隔离开关

额定工作电压:交流 380V, 660V; 直流 220V。
额定绝缘电压: 1000V。
产品主要技术性能见表 2.7-20。

表 2.7-18 QA 隔离开关主要技术性能

型 号		QA125	QA160	QA200	QA400	QA630	QA1000
约定封闭发热电流 (A)		125	160	200	400	630	1000
额定工作电流 /功率 (AC) (A/kW)	380V, $\cos\varphi=0.35$, AC-23	125/75	160/90	200/110	400/200	630/355	1000/500
	660V, $\cos\varphi=0.35$, AC-23	125/110	160/150	160/150	400/375	400/375	800/710
	660V, $\cos\varphi=0.65$, AC-22	125/—	160/—	200/—	400/—	630/—	1000/—
	1000V, $\cos\varphi=0.65$, AC-22	63/—	63/—	63/—	400/—	630/—	1000/—
	1000V, $\cos\varphi=0.35$, AC-23	—			315/425	315/425	355/475
额定工作电流 (DC) (A)	220V, $L/R=15\text{ms}$, DC-23	125	160	200	400	630	1000
	440V, $L/R=15\text{ms}$, DC-23	125	160	160	400	500	800
额定接通能力 (660V, AC-23) (A)		1250	1600	1600	4000	4000	8000
额定分断能力 (660V, AC-23) (A)		1000	1280	1280	3200	3200	6400
额定容性容量 (380V) (kvar)		62	79	99	197	251	493
额定限制短路电流 (有效值) (kA)	380V	100					
	660V	50					
最大熔断体 (A)		200	400	630	1000	—	
额定短路接通能力 (峰值, 660V) (kA)		50			60		85
额定短时耐受能力 1s (有效值, 660V) (kA)		4			15		50
机械寿命 (次)		15 000	12 000	3000	3000	—	
电寿命 (次)		1000	300	200	150	—	
中性极电流/额定工作电流 (AC-22) (A/A)		125/125	160/160	200/200	400/400	400/400	630/630
中性线电流 I_{th} (A)		125	160	200	400	400	1000
辅助开关 380V/AC-15 220V/DC-13 (A)		4					

表 2.7-19

QA 隔离开关外形尺寸

1111

型 号	宽	高	深
QA125	155	116	205~301
QA160, QA200	155	127	205~301
QA400	240	160	284~342
QA630	240	180	284~342
QA1000	345	270	295~330

表 2.7-20

QP 隔离开关主要技术性能

型 号			QP250	QP630	QP1000	QP1250	QP1600	QP2500	QP3150
约定封闭发热电流 (A)			250	630	1000	1250	1600	2500	3150
额定工作 电流 (A)	AC	380V, $\cos\varphi=0.95$, AC-21	250	630	1000	1250	1600	2500	3150
		380V, $\cos\varphi=0.65$, AC-22	250	630	630	800	800	—	—
		660V, $\cos\varphi=0.95$, AC-21	250	630	1000	1250	1470	2500	2500
	DC	220V, $L/R=15\text{ms}$, DC-21	250	630	1000	1250	1600	2500	3150
额定接通能力 (380V, AC-21) (A)			375	945	1500	1875	2400	3750	4725
额定分断能力 (380V, AC-21) (A)			375	945	1500	1875	2400	3750	4725
额定容性容量 (380V) (kvar)			123	310	316	—			
额定限制短路电流 (有效值) (kA)		380V	100			—			
		660V	50		—				
最大熔断体 (A)			250	630	1000	—			
额定短路接通能力 (峰值, 660V) (kA)			60	85		100		130	
额定短时耐受能力 (1s, 有效值, 660V) (kA)			8	32		50		80	
机械寿命 (次)			15 000	12 000		3000		1000	
电寿命 (次)			1000	200	150	100			
中性极电流额定工作电流 (AC-22) (A/A)			250/250	400/400	500/500	630/630	—		
中性线电流 I_{th} (A)			250	400	600	1000	1000	—	
辅助开关 (380V/AC-1, 220V/DC-13) (A)			4			6			

该隔离开关的容量较大,其直流开关的连接型式见图 2.7-33。产品的外形尺寸见表 2.7-21。1600A 及以下产品外形见图 2.7-22,2500~3150A 产品见图 2.7-34。同类型的产品型号有 HH15P 隔离开关。

表 2.7-21

QP 隔离开关外形尺寸

TMM

型 号	宽	高	深
QP250	155	143	250~301
QP630/QP1000	240	170/218	284~342
QP1250, QP1600	345	350	295~330
QP2500/QP3150	395	446/462	455~490

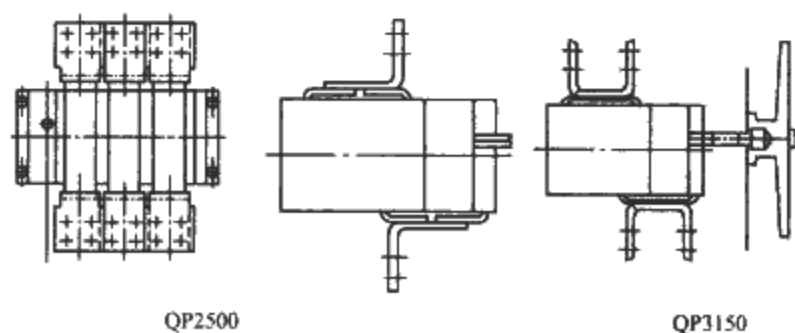


图 2.7-34 QP2500~3150 外形

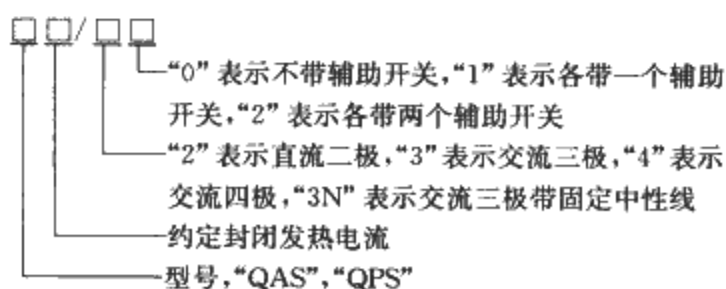
3.3.3 QAS、QPS 双投隔离开关

该系列双投隔离开关采用一个独特的双投连锁机构，控制两台并列安装的 QA 或 QP 隔离开关，突现双路电源转换。若采用具有防误性能的旋转手柄机构操作，具有三个明显通断位置（可外接指示灯）。该装置操作灵活、安全可靠，主要用于低压成套配电装置中，作为手动不频繁操作的双电源转换开关。

额定工作电压 (V): 交流 380, 660, 1000; 直流 220, 440。

额定绝缘电压: 1000V。

型号及其含义如下:



产品的主要技术性能见表 2.7-22。

表 2. 7-22 QAS、QPS 双投隔离开关产品主要技术性能

型 号		QAS 125	QAS 160	QAS 200	QAS 400	QAS 630	QAS 1000	QPS 250	QPS 630	QPS 1000	QPS 1250	QPS 1600	QPS 2500	QPS 3150
约定封闭发热电流 (A)		125	160	200	400	630	1000	250	630	1000	1250	1600	2500	3150
额定工作 电流/ 功率(AC) (A/kW)	380V,cosφ=0.35,AC-23	125/ 75	160/ 90	200/ 110	400/ 200	630/ 355	1000/ 500							
	660V,cosφ=0.35,AC-23	125/ 110	160/ 150	160/ 150	400/ 375	400/ 375	800/ 710							
	1000V,cosφ=0.65,AC-22	63/ —	63/ —	63/ —	400/ —	630/ —	1000/ —							
	1000V,cosφ=0.35,AC-23				315/ 425	315/ 425	355/ 475							
	660V,cosφ=0.65,AC-22	125/ —	160/ —	200/ —	400/—	630/ —	1000/ —							
	380V,cosφ=0.95,AC-21							250/ —	630/ —	1000/ —	1250/ —	1600/ —	2500/ —	3150/ —
	380V,cosφ=0.65,AC-22							250/ —	630/ —	630/ —	800/ —	800/ —	—	—
	660V,cosφ=0.95,AC-21							250/ —	630/ —	1000/ —	1250/ —	1470/ —	2500/ —	2500/ —
额定工作 电流 (DC)(A)	220V,L/R=15ms,DC-23①	125	160	200	400	630	1000	250	630	1000	1250	1600	2500	3150
	440V,L/R=15ms,DC-23	125	160	160	400	630	800							
额定接通能力(660V,AC-23)		1250	1600	1600	4000	6300	8000							
额定分断能力(660V,AC-23)		1250	1280	1280	3200	5040	6400							
额定接通分断能力(380V,AC-21)								375	945	1500	1875	2400	3750	4725
额定容性容量(380V)(kvar)		62	79	99	197	251	493	123	310	316	—	—	—	—
额定短路接通能力(峰值,660V)(kA)		50			60		85	60	85		100		130	
额定短时耐受电流(1s,有效值,660V)(kA)		4			15		50	15	32		50		80	
机械寿命(次)		15 000			12 000		3000	15 000	12 000		3000		1000	
电寿命(次)		1000			300	200	150	1000	200	150	100			
辅助开关 380V/AC-15 220V/DC-13(A)		4					6	4			6			

① 对于 QPS 系列为 DC-21。

QAS、QPS 产品的外形尺寸见表 2. 7-23 及图 2. 7-35。
同类型的产品型号有 HH15AS 及 HH15PS 双投隔离开关。

3. 3. 4 GL 隔离开关

该开关特点是模块化设计结构，具有灵活多样的组合。
有直接观察触头通断状态的窗口，有柜内、柜外操作，有正
面、侧面操作，有板前或板后接线等。由于触点接通与分断
速度与手柄操作速度无关，极大提高了各项电气性能和机械
性能。

额定工作电压：交流 660V 或 380V。直流 440V
或 220V。

额定绝缘电压：1000V 或 750V。

表 2. 7-23 QAS、QPS 双投隔离开关产品外形尺寸 mm			
型 号	宽	高	深
QSS63/QSS125, QAS125	430	170	260
QAS160, QAS200/QPS250	430	170	260

续表

型 号	宽	高	深
QSS250, QSS400, QAS400, QAS630, QPS630/QSS160	630	190	300
QPS1000	630	190	300
QSS630, QAS1000, QPS1250, QPS1600	950	265	370
QPS2500/QPS3150	950	265	450

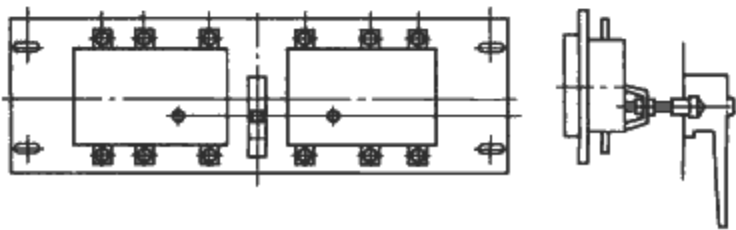


图 2. 7-35 QSS、QAS、QPS 外形

表 2.7-27 双投隔离开关前后排列外形及安装尺寸 mm

额定工作电流	宽	高	深
125~160A/3/125~160A/4	267	135	212
200~250A/3/200~250A/4	300/350	170	236/309
315~400A/3/315~400A/4	400/460	240	309
500~630A/3/500~630A/4	400/460	260	309
1000A/3/1000A/4	574/699	312	389
1250A/3/1250A/4	574/699	338	389
1600A/3/1600A/4	574/699	338	389

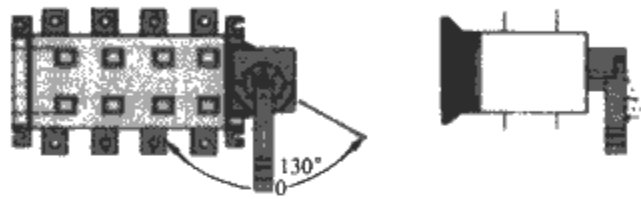


图 2.7-36 GLZ1-160~1600A 直接操作外形

双投隔离开关左右排列的外形尺寸见表 2.7-28 及图 2.7-37。

表 2.7-28 双投隔离开关左右排列外形尺寸 mm

额定工作电流	宽	高	深
125~160A/3/125~160A/4	319/379	135	141
200~250A/3/200~250A/4	405/505	170	146
315~400A/3/315~400A/4	535/655	240	191
500~630A/3/500~630A/4	535/655	260	191
1000A/3/1000A/4	836/1076	312	239.5
1250~1600A/3/1250~1600A/4	836/1076	338	239.5

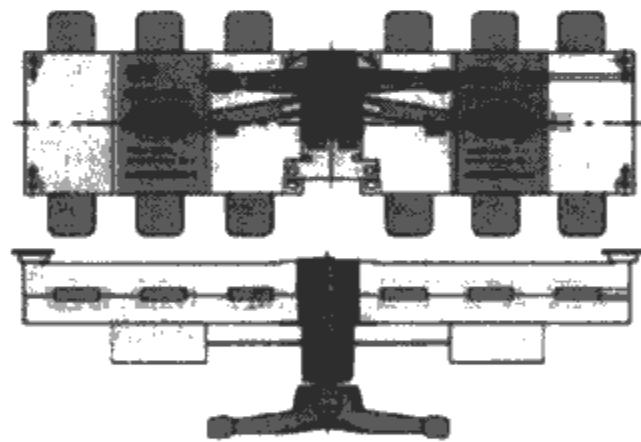


图 2.7-37 GLZ2-160~1600A/3 直接操作外形

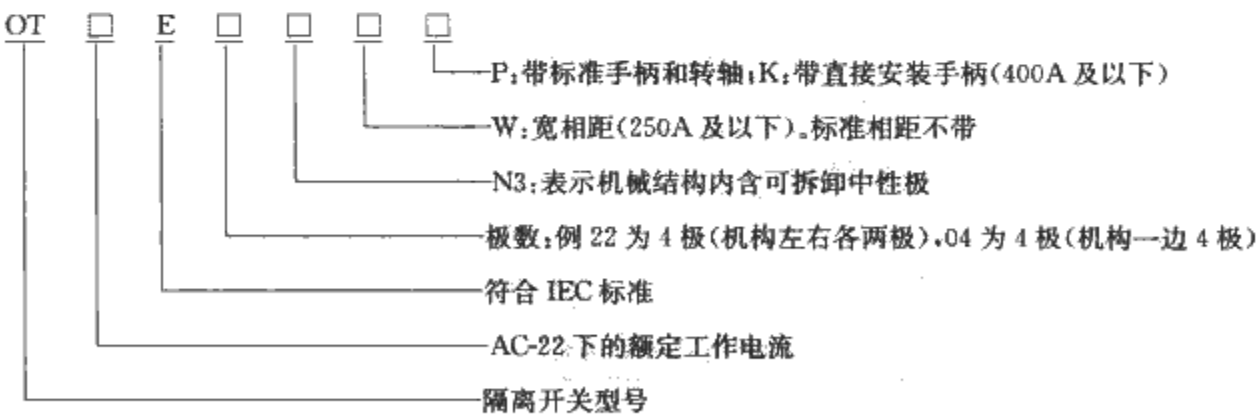


图 2.7-38 HL-30 隔离开关外形

表 2.7-29 HL30 隔离开关产品外形尺寸 mm

宽				高	深
1 极	1+N 极	3 极	3+N 极		
17.8	35.5	53.4	71.2	82	69.65

3.3.6 OT 隔离开关

产品的特点是采用紧凑的双弹簧操动机构，辅助触头装于机构内置卡槽；双断点触头快速通断；提供 3 种操作手柄；可水平或垂直安装，甚至天花板安装；250A 及 200A 规格提供宽相距产品等。

额定工作电压：交流 690V 及以下，直流 680V 及以下。
额定绝缘电压：1000V。
型号及其含义如下：

产品的主要技术性能见表 2.7-30。

表 2.7-30 OT 隔离开关主要技术性能

型 号		OT200	OT250	OT315	OT400	OT630	OT800
约定自由空气发热电流和额定工作电流 (环境温度 40℃, AC-20 和 DC-20) (A)	自由空气	200	250	315	400	630	800
	封闭环境	200	250	315	400	630	720

续表								
型 号		OT200	OT250	OT315	OT400	OT630	OT800	
额定工作电流 (AC-21A, AC-22A, AC-23A, 690V) (A)		200	250	315	400	630	800	
额定工作电流/极间串联 (A/极)	48V	200/1	250/1					
	DC-21A, 110~220V	200/2	250/2					
	DC-22A, 440V	200/3	250/3					
	DC-33A, 500~680V	200/4 ^②	250/4 ^②					
额定功率 (AC-23) ^① (kW)		230V	60	75	100	110	200	250
		400V	110	140	160	220	355	400
		415V	110	145	185	230	355	400
		500V	140	170	220	280	400	560
		690V	190	240	310	390	630	800
额定分断容量 (AC-23, ≤690V) (A)		1600	2000	2520	3200	5040	6400	
额定短时耐受电流有效值 I_{cw} (kA)	690V, 0.15s	15	15	31	31	38	38	
	690V, 0.25s	15	15	24	24	36	36	
	690V, 1s	8	8	15	15	18	18	
额定短路接通电流 (峰值) I_{cm} (690V) (kA)		30	30	65	65	80	80	
功率损耗/极 (额定电流) (W/极)		4	6.5	6.5	10	25	40	
机械寿命 (开合次数除以 2) (次)		20 000	20 000	16 000	16 000	10 000	10 000	

① 此数据仅供参考, 可能因电机制造商不同而有所差别。
② B类别。

产品的外形尺寸见表 2.7-31 和图 2.7-39。

表 2.7-31 QT 隔离开关外形尺寸 mm					
型号	尺寸	E01	E02	E03	E04
OT200 OT250	宽	75.5	110.5	145.5	180.5
	高/深	150/189~254			
OT315 OT400	宽	103	147	191	235
	高/深	185/165~245			
OT630 OT800	宽	136	210	266	331
	高/深	250/160~285			

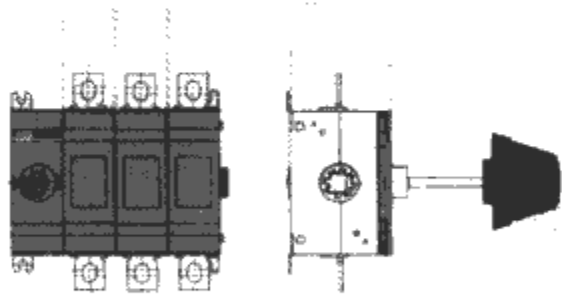


图 2.7-39 OT200-P 和 OT250-P 外形

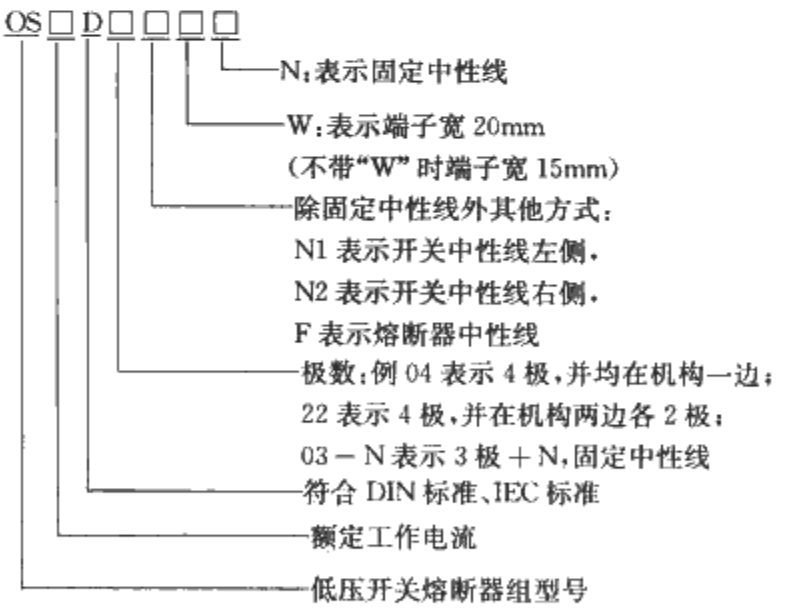
3.4 低压开关熔断器组典型产品技术参数与性能

3.4.1 OS 低压开关熔断器组

产品的特点是熔断器支架完全符合 IP20 防护等级, 开

关处于合闸位置时熔断器面盖不能打开, 开关处于分闸位置时熔断器两端同时隔离, 安装方式可轨装或固定安装 (包括倒装), 并可带电子式熔体监视器 (熔体烧断后瞬时跳闸); 可配有多种手柄并可带挂锁等。

额定工作电压: 交流 690V 及以下, 直流 440V 及以下。
额定绝缘电压: 1000V。
型号及其含义如下:



产品的主要技术性能及外形尺寸见表 2.7-32 及图 2.7-40。

表 2. 7-32		OS 低压开关熔断器组			
型 号		OS32	OS63	OS125	OS160
约定自由空气发热电流（开启）（A/W）		32/7. 5	63/7. 5	125/12	160/12
额定工作电流 40℃（封闭）（A/W）		32/7. 5	63/7. 5	125/12	160/10, 135/12
额定工作电流（AC-21A、AC-22A、AC-23A，690V）（A）		32	63	125	160
额定工作电流/极间串联 （DC-21A、DC-22A） （A/极）	48V	32/2	63/2	125/2	160/2
	110～220V	32/3	63/3	125/2	160/2
	440V	32/4	63/4	125/3	160/3

续表

型 号		OS32	OS63	OS125	OS160
额定工作电流/极间串联 (DC-23A) (A/极)	48V	32/2	63/2	125/2	160/2
	110~220V	32/3	63/3	125/2	160/2
	440V	32/4	63/4	125/4	125/4
额定功率 AC-23 (适用于 3 相 1500r/min 的标准异步电动机) (kW)	230V	9	18.5	37	45
	400V	15	30	60	80
	415V	15	30	60	90
	500V	22	37	80	110
	690V	30	60	110	132
额定分断容量 (AC-23, ≤690V) (A)		504	504	1000	1280
额定分断容量/极间串联 (DC-23) (A/极)	≤220V	128/3	252/3	500/2	640/2
	440V	128/4	252/4	500/4	500/4
额定限制短路电流有效值 [相应熔断器单相试验 (IEC 60269) 的截断电流值] (kA)	80kA, 415V	17	17	22	22
	100kA, 500V	17	17	22	22
	50kA, 690V	13	13	15	15
额定短时耐受电流 1s (有效值) (kA)		2.5	2.5	5	5
额定容性容量 (kvar)	400V	15	30		
	415V	16	32		
	690V	26	50		
功率损耗 (额定工作电流, 无熔断器) (W)		1	4	5	9
机械寿命 (开合次数除以 2) (次)		20 000	20 000	20 000	20 000
IEC 60269-2 熔断器规格 DIN43620		000, 00	000, 00	000, 00	000, 00
外形尺寸 (mm)	W	143/3 极, 188/4 极		179.5/3 极, 214.5/4 极	
	H	100		144	
	D	141~260		140~263	

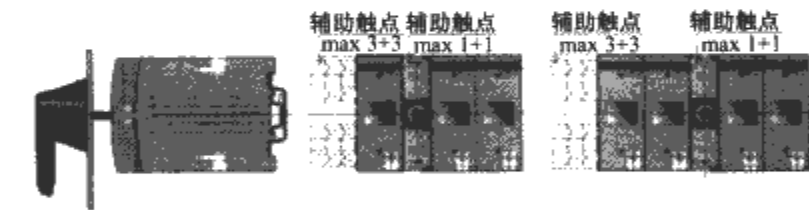


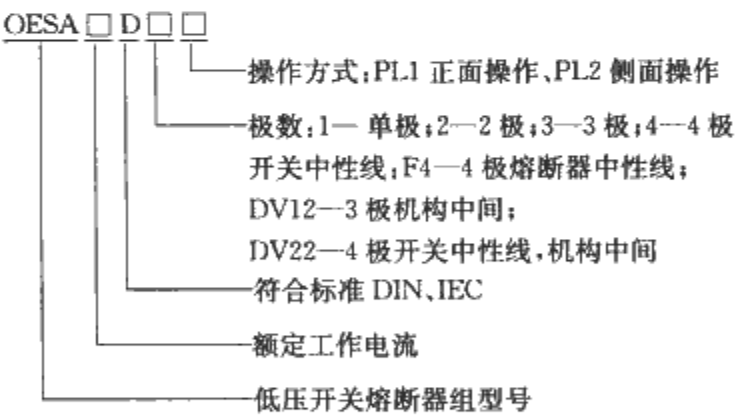
图 2.7-40 OS32 和 OS63 外形尺寸

3.4.2 OESA 低压开关熔断器组

该产品有大容量规格，其特点是触头可视；具备机械和电气连接；双断口触头使熔断体更换安全；采用卡装式熔断器盖和端子罩保护所有带电部分；可用于 2 型协调保护电动机启动器场合，满足选择性要求；具有电动机操作；操动机构安装多样，可置于一端、极间或侧面等。

额定工作电压：交流 690V 及以下，直流 1000V 及以下。

额定绝缘电压：1000V。
型号及其含义如下：



产品的主要技术性能见表 2.7-33。

表 2.7-33 OESA 低压开关熔断器组技术性能

型 号			OESA250	OESA400	OESA630	OESA800
约定自由空气发热电流 (40℃)	开启 (A/W)		250/32	400/45	630/60	800/65
	封闭 (A/W)		250/23 230/27	400/34 360/37	600/45 570/50	720/55
	封闭 (硬连接) (A)		315	450	700	910
额定工作电流 (A)	AC-21A, AC-22A, ≤690V		250	400	630	800
	AC-23A, ≤690V		250	400	630	720
额定工作电流/ 极间串联 (A/极)	DC-21A	48~440V	250/2	400/2	630/2	800/2
	DC-22A	500~750V	250/3	400/3	630/3	800/3
		1000V	250/4	400/4	630/4	800/4
	DC-23	48~440V	250/2	400/2	630/2	800/2
		500~750V	250/3	400/3	630/3	800/3
		1000V	—	—	630/4	800/4

型 号		续表			
		OESA250	OESA400	OESA630	OESA800
额定功率 AC-23 (适用于 3 相 1500r/min 的标准异步电动机) (kW)	230V	70	110	180	200
	400V	132	210	315	350
	415V	140	230	340	380
	500V	170	280	400	470
	690V	230	330	540	600
额定分断容量 (AC-23, ≤690V) (A)		2000	3200	5760	5760
额定分断容量/极间串联 (A/极)	DC-23, ≤440V	1000/2	1600/2	3200/2	3200/2
	500~750V	1000/3	1600/3	3200/3	3200/3
	1000V	—	—	3200/4	3200/4
额定限制短路电流有效值 (相应熔断器单相试验 (IEC 60269) 的截断电流值) (kA)	80kA, 415V	40	40	75	75
	100kA, 500V	40	40	75	75
	50kA, 690V	35	35	60	60
额定短时耐受电流 (1s, 有效值) (kA)		8	10	16	16
额定容性容量 (kvar)	400V	105	180	250	310
	415V	115	200	270	340
	690V	190	325	450	550
功率损耗/极 (额定工作电流无熔断器) (W)		11	30	55	77
机械寿命 (开合次数除以 2) (次)		16000	16000	10000	10000
IEC 60269-2 熔断器规格 DIN 43620		0—1	0—2	3	3

产品的尺寸及外形见表 2.7-34 (250A 及 400A) 及图 2.7-41。

表 2.7-34 OESA 低压开关熔断器组产品外形尺寸 mm

型 号	宽	高	深
OESA 250DV12PL	278	200	230~340
OESA 250DV22PL	340		
OESA 400DV12PL	302		
OESA 400DV22PL	372		
OESA 630DV12PL	378	290	255~325
OESA 630DV22PL	458		
OESA 800DV12PL	408		
OESA 800DV22PL	498		

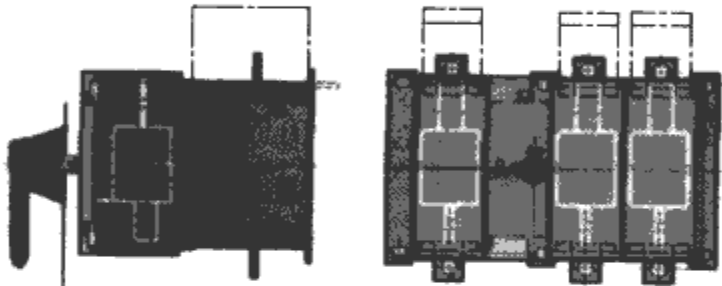
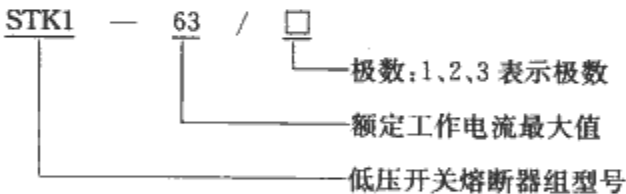


图 2.7-41 OESA630DV 和 OESA800DV 外形

额定绝缘电压：380V。
使用类别：AC-22；DC-21。
型号及其含义如下：



产品的主要技术性能及外形尺寸见表 2.7-35。

表 2.7-35 STK1 低压开关熔断器组的主要技术性能及外形尺寸

额定工作电压 (V)	额定限制短路电流 (有效值) (kA)	额定电流 (A)		外形尺寸 (mm)		
		熔断体①	熔体	宽	高	深
380	20	63	20, 25, 35, 50, 63	27/1P, 54/2P, 81/3P	96	73
250	8					

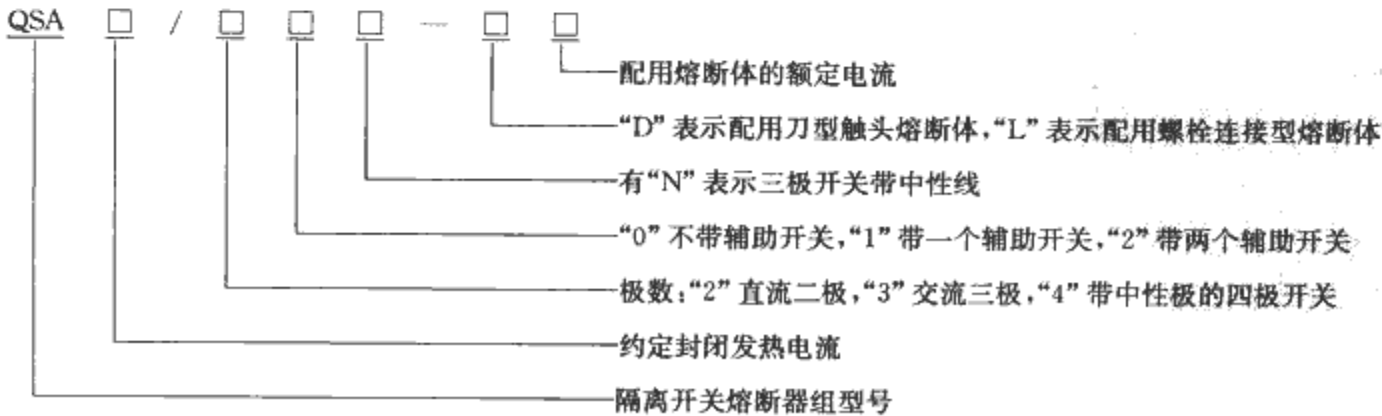
① 配用熔断体为 D02-63 熔断体。

3.5 低压隔离开关熔断器组典型产品技术参数与性能

3.5.1 QSA 隔离开关熔断器组

额定工作电压：交流 380V, 660V, 1000V；直流 220V，

440V。
额定绝缘电压：1000V。
型号及其含义如下：



产品的主要技术性能见表 2.7-36。直流开关的连接型式 见图 2.7-33。同类型的产品型号有 HH15 隔离开关熔断器组。

表 2.7-36 QSA 隔离开关熔断器组主要技术性能

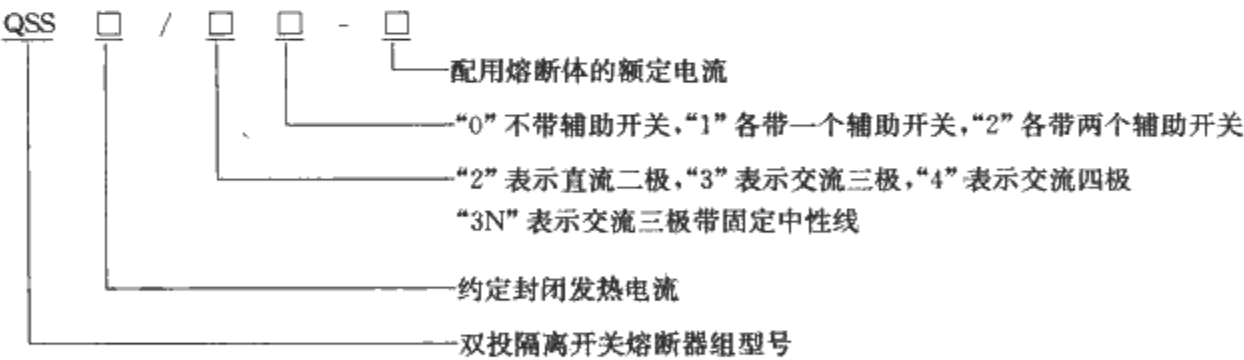
型 号		QSA63	QSA125	QSA160	QSA250	QSA400	QSA630	QSA800
约定封闭发热电流 (A)		63	125	160	250	400	630	800
额定工作电流 / 功率 (AC) (A/kW)	380V, cosφ=0.35, AC-23	63/30 ^①	125/75	160/90	250/132	400/200	630/333	800/425
	660V, cosφ=0.35, AC-23	63/55 ^①	125/110	160/150	250/220	400/375	630/560	800/710
	1000V, cosφ=0.65, AC-22	63/—	63/—	160/—	250/—	400/—	630/—	800/—
	1000V, cosφ=0.35, AC-23	—	—	160/220	250/325	315/425	355/475	355/475
额定工作电流 (DC) 220V, 440V, L/R=15ms, DC-23		63	125	160	250	400	630	800
额定接通能力 (AC-23, 660V) (A)		630 ^①	1250	1600	2500	4000	6300	8000
额定分断能力 (AC-23, 660V) (A)		504 ^①	1000	1280	2000	3200	5040	6040
额定容性容量 (380V) (kvar)		31	62	78	123	197	315	390
额定限制短路电流 (有效值) (kA)	380V	100						
	660V	50						
最大熔断体 (A)		160			400		630	800
配用熔断体尺码号	刀型	00			1—2		3	
	螺栓连接型	00			1—2		3	
机械寿命 (次)		15000			12000		3000	
电寿命 (次)		1000			300		200	150
中性极电流 I _{th} /额定工作电流 (AC-22), 中性线电流 I _{th} (A)		63	125	160	250	400	630	800
辅助开关 (380V/AC-15 220V/AC-13) (A)		4					6	

① cosφ=0.45。

产品的外形尺寸见表 2.7-37。

表 2.7-37 QSA 隔离开关熔断器组外形尺寸 mm

型 号	宽	高	深
QSA63/QSA125	155	100/116	170
QSA160/QSA250-400	240	146/160	209
QSA630、QSA800	345	270	250



产品的主要技术性能见表 2.7-38。同类型的产品型号有 HH15 双投隔离开关熔断器组。

表 2.7-38 QSS 双投隔离开关熔断器组主要技术性能

型 号		QSS63	QSS125	QSS160	QSS250	QSS400	QSS630	QSS800
约定封闭发热电流 (A)		63	125	160	250	400	630	800
额定工作电流 / 功率 (AC) (A/kW)	380V, cosφ=0.35, AC-23	63/30 ^①	125/75	160/90	250/132	400/200	630/333	800/425
	660V, cosφ=0.35, AC-23	63/55 ^①	125/110	160/150	250/220	400/375	630/560	800/710
	1000V, cosφ=0.65, AC-22	63/—	63/—	160/—	250/—	400/—	630/—	800/—
	1000V, cosφ=0.35, AC-23	—	—	160/220	250/325	315/425	335/475	355/475
额定工作电流 (DC, 220V, 440V, L/R=15ms, DC-23) (A)		63	125	160	250	400	630	800
额定接通能力 I _{cm} (660V, AC-23) (A)		630 ^①	1250	1600	2500	4000	6300	8000

续表

型 号		QSS63	QSS125	QSS160	QSS250	QSS400	QSS630	QSS800
额定分断能力 (660V, AC-23) (A)		504 ^①	1000	1280	2000	3200	5040	6040
额定容性容量 (380V) (kvar)		31	62	78	123	197	315	390
额定限制短路电流 (有效值) (kA)	380V	100						
	660V	50						
最大熔体 (A)		160			400		630	800
配用熔断体尺码号	刀型	00			1—2		3	
	螺栓连接型	00		1—2			3	
机械寿命 (次)		15000			12000		3000	
电寿命 (次)		10000			300		200	150
辅助开关 (380V/AC-15, 220V/DC-13) (A)		4					6	

① $\cos\varphi=0.45$ 。

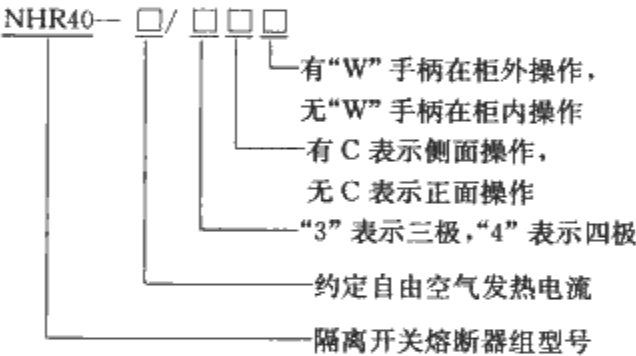
3.5.3 NHR40 隔离开关熔断器组

开关采用热固性塑料全封闭式结构, 保证工作安全可靠。每相都有两组双断点的触头系统, 两组触头串联, 提高开关的电流分断能力, 保证开关电源隔离可靠。手动式旋转操作机构, 带有储能弹簧, 因此动触头能快速运动与操作速度无关。正面柜外操作时可以挂锁。

额定工作电压: 交流 660V 及以下, 直流 440V 及以下。

额定绝缘电压: 800V。

型号及其含义如下:



产品的主要技术性能见表 2.7-39。

表 2.7-39 NHR40 隔离开关熔断器组主要技术性能

约定自由空气发热电流 (A)		160	250	400	630
gG 熔断体额定电流 (A)		125, 160	200, 250	315, 400	630
额定工作电流 (A)	380V, AC-21、AC-22	125, 160	200, 250	315, 400	630
	660V, AC-21、AC-22	100①, 100①	200①, 250①	315①, 315①	425
	220V, DC-21、DC-22	125, 160	200②, 250	315	400
	440V, DC-20、DC-21	100②, 100②	200②, 250②	315②, 315②	425
额定限制短路电流 (kA)		50	50	50	50
熔断体尺码号		00	1	2	3

① 带端子护罩。
② 按极性 2 相串联连接。

产品的外形尺寸见表 2.7-40 及图 2.7-42。

表 2.7-40 NHR40 隔离开关熔断器组外形尺寸 mm

规 格	宽	高	深
160/3/ 160/4	165/202	162	190
250/3/ 250/4	240/300	195	210
400/3/ 400/4	280/346	205	210
630/3/ 630/4	346/426	300	350

表 2.7-41 HG30 熔断器式隔离器主要技术性能

额定工作电流 (A)	额定限制短路电流		空载操作循环次数	配用熔断体尺码 (mm×mm)	额定电流 (A)	
	电流 (有效值) (kA)	$\cos\varphi$			熔断体	熔 体
20	20	0.3	3000	8.5×31.5	20	2, 4, 6, (8), 10, (12), 16, 20
32				10.3×38	32	2, 4, 6, (8), 10, (12), 16, 25, 32

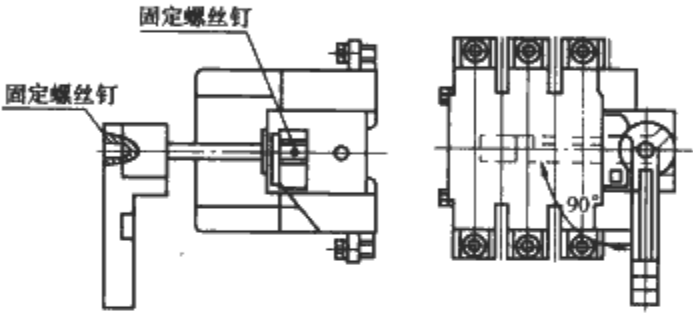


图 2.7-42 NHR40 隔离开关熔断器组外形

3.6 熔断器式隔离器典型产品技术参数与性能

3.6.1 HG30 熔断器式隔离器

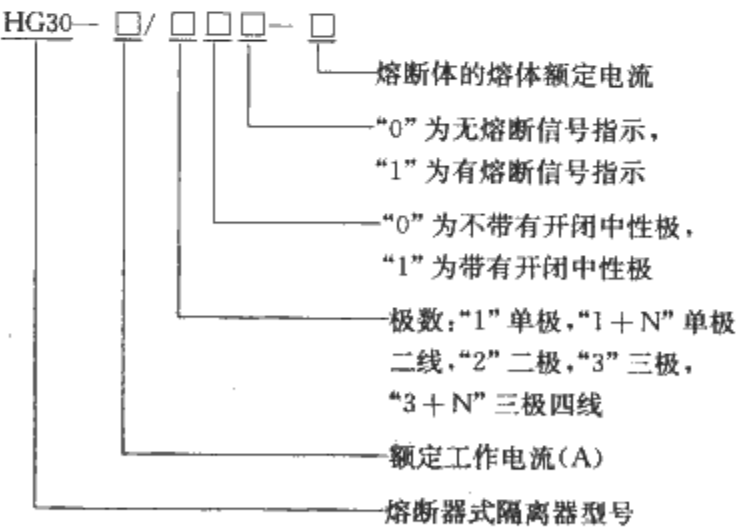
产品为轨道安装模数化熔断器式隔离器。选用 RT14 圆管式熔断体放置在手柄内。在打开位置上, 相线与中线同时断开, 更换熔断体安全可靠。并由氖灯和电阻组成熔断体熔断信号指示。

额定工作电压: 交流 380V。

额定绝缘电压: 380V。

使用类别: AC-20B。

型号及其含义如下:



产品的主要技术性能见表 2.7-41。同类型的产品型号有 XKG30 熔断器式隔离器。

产品的外形尺寸为 18（单极）×90×85（宽×高×深）mm³，外形见图 2.7-24。

3.6.2 HG2 熔断器式隔离器

产品为三相竖式布置，操作手柄上配装 RT16（或 NT）-00 熔断体。闭合时其触头压力由 U 形弹簧夹紧插座而确保。带有熔断指示器，熔断体采用弹性卡装，隔离器断开时熔断体两端全部脱离插座，更换安全、方便。

额定工作电压：交流 380V。

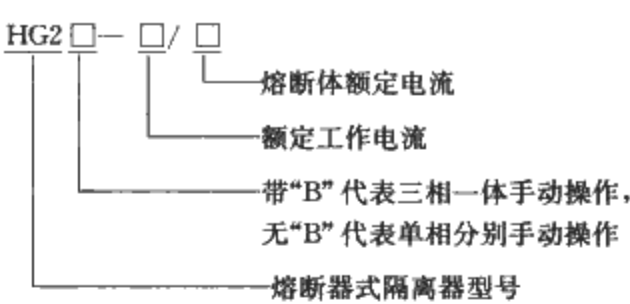
额定绝缘电压：500V。

使用类别：AC-20（在规定条件下，也可用于 AC-22）。 2.7-30。

表 2.7-42 HG2 熔断器式隔离器主要技术性能及外形尺寸

型号	额定工作电流 (A)	额定接通与分断能力						通断次数次	电操作性能						操作次数 (次)	额定限制短路电流 (kA)	外形尺寸 (mm)		
		接通			分断				接通			分断					W	H	D
		I/I_N	U/U_N	$\cos\varphi$	I/I_N	U_r/U_N	$\cos\varphi$		I/I_N	U/U_N	$\cos\varphi$	I/I_N	U_r/U_N	$\cos\varphi$					
HG2	160	3.0	1.1	0.65	3.0	1.1	0.65	5	1	1	0.65	1	1	0.65	50	50	76	450	148
HG2B																			167

型号及其含义如下：



产品的主要技术性能及外形尺寸见表 2.7-42，外形见图

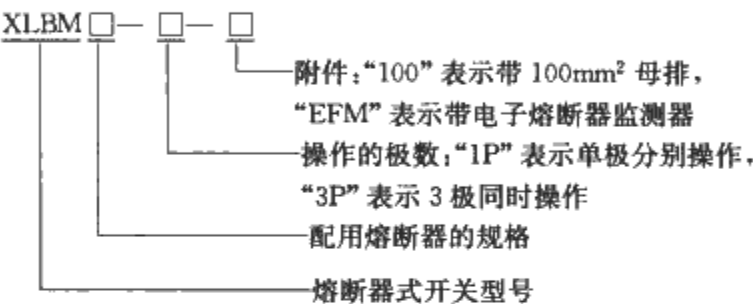
3.7 熔断器式开关典型产品技术参数和性能

XLBM 直列式熔断器式开关的产品特点是：附件齐全（例如电压及电流测量、挂锁、辅助触头及电源插头等），见图 2.7-43；上、下或侧面电缆连接；前面板具有 IP30 防护等级；可带电子熔断器监视装置等。

额定工作电压：交流 690V 及以下。

额定绝缘电压：1000V。

型号及其含义如下：



产品的主要技术性能见表 2.7-43。

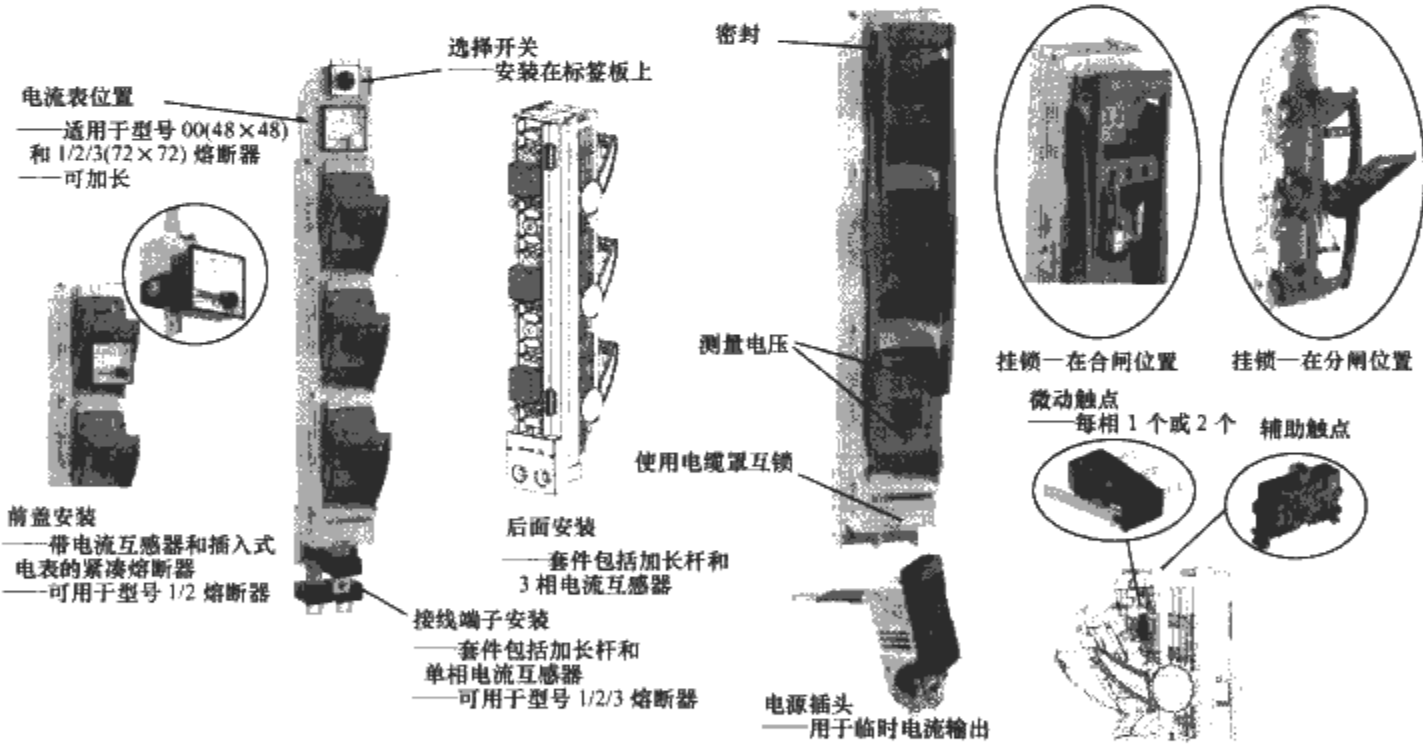


图 2.7-43 XLBM 直列式熔断器式开关附件

表 2.7-43 XLBM 直列式熔断器式开关的主要技术性能

规 格		XLBM00			XLBM1			XLBM2			XLBM3		
配用熔断器的规格（符合 IEC 60269-2-1 标准）		00			1			2			3		
额定工作电压 (V)		400	500	690	400	500	690	400	500	690	400	500	690
额定工作电流 (A)		160	160	125	250	250	200	400	400	315	630	630	500
约定自由空气发热电流（带熔断器） I_{th} (A)		160			250			400			630		
额定限制短路电流（有效值）(kA)		50			50			50			50		
额定接通和分断能力（使用类别）		AC23B	AC22B	AC21B	AC23B	AC22B	AC21B	AC23B	AC22B	AC21B	AC23B	AC22B	AC21B
额定频率 (Hz)		50~60			50~60			50~60			50~60		
在 I_{th} 下的功率损耗（不包括熔断器）(W)		19.5			27			47			104		
前盖防护等级 （符合 IEC/EN 60529 标准）	开	IP 20			IP 20			IP 20			IP 20		
	关	IP 30			IP 30			IP 30			IP 30		

电子熔断器监测器 (EFM) 可直接由内部熔断器座供电。在熔断的情况下, 内部继电器将释放, 以实现遥控报警。此外前盖的绿灯将变成红灯, 详见表 2.7-44。

表 2.7-44 EFM 前蓋的紅綠燈顯示

状 态		XLBM-3P EFM	绿 灯		红 灯	
开 关 闭 合	熔断器状态	电压相	显示		显示	
	熔断器正常	3 相正常	×			×
	熔断器正常	1 相失相	× (L1)	× (L2, L3)		×
	熔断器正常	2~3 相失相		×		×
	熔断器熔断	3 相正常		×	×	
	熔断器熔断	1 相失相		×	× (L1)	× (L2, L3)
	熔断器熔断	2~3 相失相		×		×
开 关 断 开	熔断器正常	相正常		×		×
	熔断器正常	失相		×		×
	熔断器熔断	相正常		×		×
	熔断器熔断	失相		×		×

注 × (L1): 当 L1 失相时。
× (L2, L3): 当 L2 或 L3 或两者同时失相时。

产品的外形尺寸见表 2.7-45。

表 2.7-45 XLBM 直列式熔断器式开关外形尺寸 mm

规格	宽	高	深
XLBM00	48.5	660	136.5~142.5 (加长 37)
XLBM1/2/3	97.5	660	177~177.5 (加长 27.5)

3.8 熔断器式隔离开关典型产品技术参数与性能

3.8.1 NHRT40 条形熔断器式隔离开关

额定工作电压：交流 660V 及以下。
额定绝缘电压：800V。

表 2.7-46 NHRT40 条形熔断器式隔离开关主要技术性能

约定自由空气发热电流 (A)		160	250	400	630
额定工作电流 (A)	380V, AC20、AC21、AC22	160	250	400	630
	660V, AC20	160	250	400	630
	660V, AC21/AC22	100	200/160	315	425/315
配用熔断体尺码号		00	1	2	3
380V 时	熔断体额定电流 (A)	20, 25, 32, 35, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160	80, 100, 125, 160, 200, 224, 250	125, 160, 200, 224, 250, 300, 315, 355, 400	315, 355, 400, 425, 500, 630
	额定限制短路电流 (kA)	100			
660V 时	熔断体额定电流 (A)	20, 25, 32, 35, 40, 50, 63, 80, 100	80, 100, 125, 160, 200	125, 160, 200, 224, 250, 300, 315	315, 355, 400, 425
	额定限制短路电流 (kA)	50			

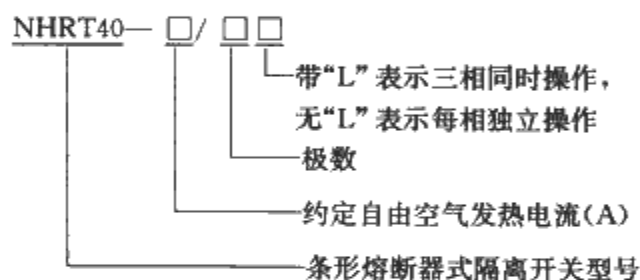
产品的外形尺寸见表 2.7-47 及图 2.7-44。

表 2.7-47 NHRT40 条形熔断器式隔离开关外形尺寸 mm

型 号	高	宽	深
NHRT40-160 每相单独操作	650	49	150
NHRT40-160/L 三相同时操作	590	49	198
NHRT40-250 400 630 每相单独操作	764	99	195
NHRT40-250 400 630/L 每相单独操作	764	99	195

使用类别, AC-20、AC-21、AC-22。

型号及其含义如下:



产品的主要技术性能见表 2.7-46。同类型的产品型号有
条形 NH 熔断器式隔离开关。

3.8.2 BMH1 熔断器式隔离开关

产品为三极全绝缘封闭式结构，盖上有透明面板，可观察内部工作状态。开关盖可方便取下。熔断体挂在盖上，更换方便安全。触头系统带引弧角，产生的电弧很易引入灭弧室。除固定式安装外，还有挂接式安装，挂在进线排上，便于快速更换。产品还可利用隔离刀替换熔断体作隔离开关用。

额定工作电压：交流 400V。

额定绝缘电压: 690V。

使用类别: AC-20B、AC-21B、AC-22B、AC-23B。

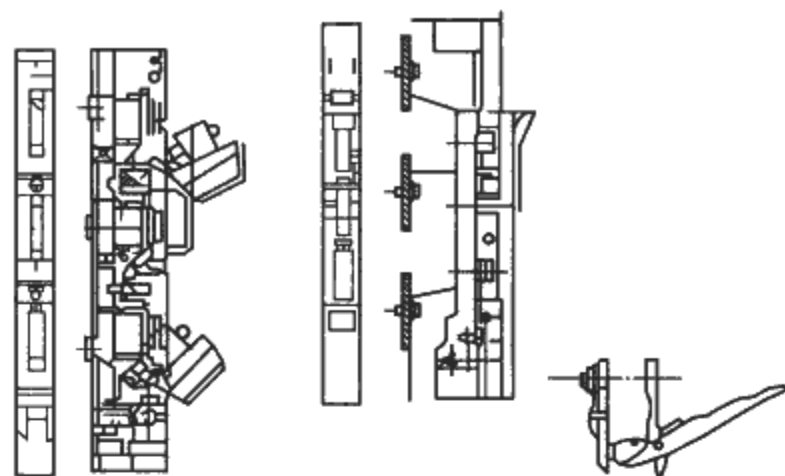
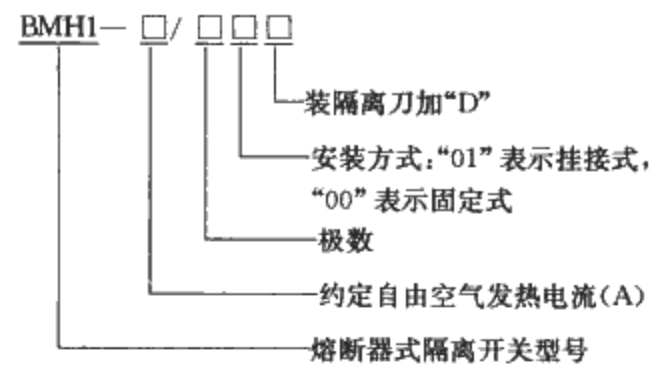


图 2.7-44 NHRT40 条形熔断器式隔离开关外形

型号及其含义如下：



产品的主要技术性能见表 2.7-48，同类型的产品型号有 NH 熔断器式隔离开关。

表 2.7-48 BMH1 熔断器式隔离开关主要技术性能

开关约定自由空气 发热电流 (A)	开关额定工作电流 (A)	熔断体尺码号	可装的熔体电流值 (A)	额定限制短路电流 (kA)
40	40	RT14-32 (R016)	10, 12, 16, 20, 25, 32, 40	50
63	63	RT14-63 (R017)	16, 20, 25, 32, 40, 50, 63	
160	160	NT00	40, 50, 63, 80, 100, 125, 160	
250	250	NT1	80, 100, 125, 160, 200, 225, 250	
400	400	NT2	125, 160, 200, 225, 250, 300, 315, 355, 400	
630	630	NT3	315, 355, 400, 425, 500, 630	

产品的外形尺寸见表 2.7-49 及图 2.7-26、27。

表 2.7-49 BMH1 熔断器式隔离开关外形尺寸 mm

型号/规格	宽	高	深
BMH1-40/2 / BMH1-40/3	57/78	117	77
BMH1-63/2 / BMH1-63/3	75/105	117	82
BMH1-160/3 / BMH1-250/3	107/185	195/244	84/114
BMH1-400/3 / BMH1-630/3	210/256	287/303	128/145
BMH1-630/3 (挂接式)	256	300	159.5

3.8.3 HR5 熔断器式隔离开关

产品由钢板底座和塑料盖组成。触刀座和灭弧室借助绝缘底座安装于钢板底座。熔断体装在盖上作动触刀。盖上有透明面板，便于观察触刀位置及熔断指示信号。盖可沿铰销旋转呈扇形打开，亦可方便取下，便于更换熔断体。灭弧室内带有金属弧角，增强引弧提高通断能力。开关还带有

表 2.7-50 HR5 熔断器式隔离开关主要技术性能

约定自由空气 发热电流 (A)	额定工作电压 (A)		RT16 (NT)	熔体电流值 (A)	额定限制短路电流 (kA)
	380V	660V			
100	100	100	00	4, 6, 10, 16, 20, 25, 32, 35, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160	100/380V (400V)
200	200	200	1	80, 100, 125, 160, 200, 224, 250	
400	400	315	2	125, 160, 200, 224, 250, 300, 315, 355, 400	50/660V (690V)
630	630	425	3	315, 355, 400, 425, 500, 630	

产品的外形尺寸见表 2.7-51 及图 2.7-45。

表 2.7-51 HR5 熔断器式隔离开关外形尺寸 mm

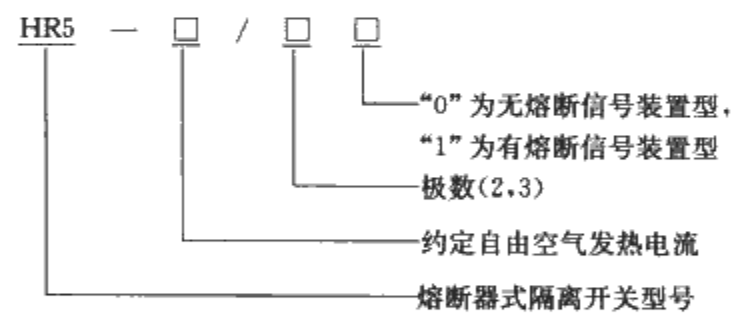
型 号	宽	高	深
HR5-100	163	249	136
HR5-200	220	280	193
HR5-400	243	280	209
HR5-630	289	280	224

3.8.4 XLP 熔断器式隔离开关

产品为 3 极底座及前盖均采用 V-O 级塑料压制（个别

LX19B 行程开关，当某相熔断时，由熔断体撞击器带动而发出断相故障信号。

额定工作电压 (V)：交流 660 (690)，380 (400)。
额定绝缘电压：690V。
使用类别：AC-21B (660V)、AC-22B (380V)。
型号及其含义如下：



产品的主要技术性能见表 2.7-50。

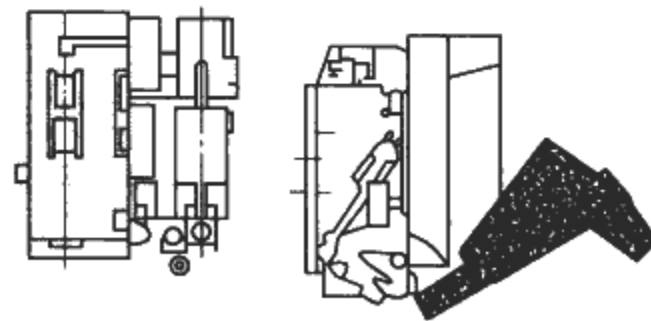
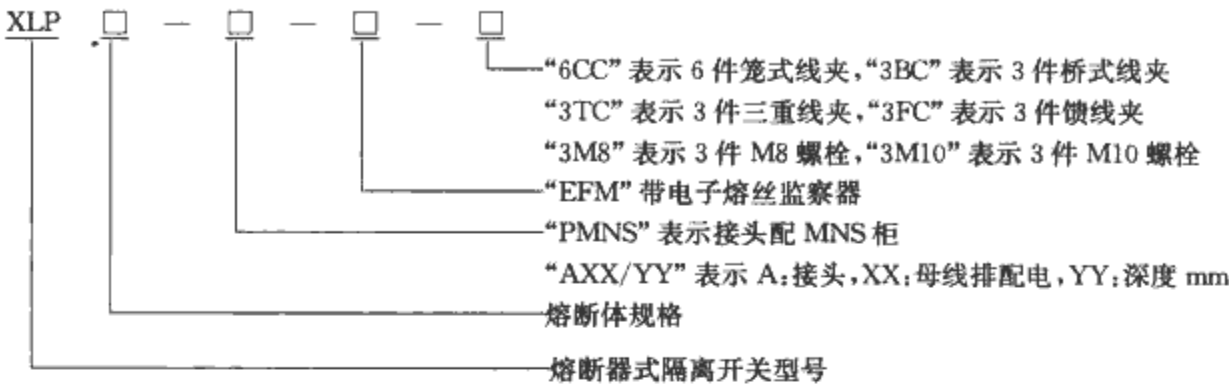


图 2.7-45 HR5-200, 400, 630 熔断器式隔离开关外形

规格有4极产品)。正面保护等级IP30,并带有IP20的电缆端子,可从正面测试电压。可带有电子熔丝监察器、辅助开关、挂锁等。除固定式安装外,还可以导轨式安装。
额定工作电压:交流690,500,400V。

额定绝缘电压:690V(100A),1000V(>100A)。
使用类别:AC-21B、AC-22B、AC-23B。
型号及其含义如下:



产品的主要技术性能及外形尺寸见表2.7-52。

表 2.7-52 XLP 熔断器式隔离开关主要技术性能及外形尺寸

型 号	XLP000			XLP00			XLP1		XLP2		XLP3	
熔丝规格	000			00			1		2		3	
3 极外形尺寸 (宽×高×深) (mm×mm×mm)	89×151×79			105×186.5×88			184×268×116		210×289×130		250×330×142	
额定工作电压 (V)	400	500	690	400	500	690	500	690	500	690	500	690
额定工作电流 (A)	80	100	50	125	160	125	250	200	400	315	630	500
约定自由空气发热电流 I_{th} (A)	100			160			250		400		630	
额定限制短路电流 (有效值) (kA)	50											
使用类别	AC23B	AC22B	AC21B	AC23B	AC22B	AC21B	AC22B	AC21B	AC22B	AC21B	AC22B	AC21B
I_{th} 时每相功耗 (不带熔丝) (W)	1.4			3.5			7.5		13		24	

3极产品的外形见图2.7-46。

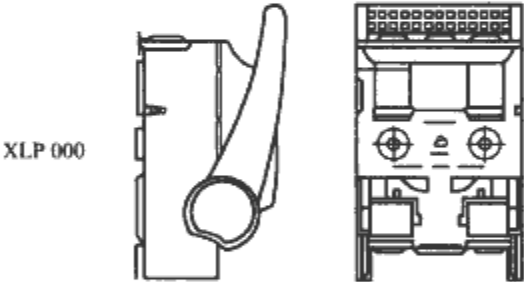
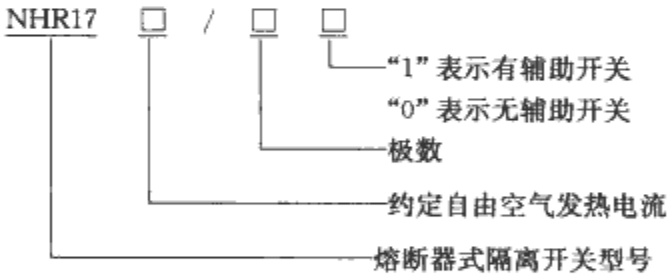


图 2.7-46 XLP 熔断器式隔离开关外形

3.8.5 NHR17 熔断器式隔离开关

额定工作电压:690V及以下。

额定绝缘电压:800V。
使用类别:AC-20、AC-21、AC-22。
型号及其含义如下:



产品的主要技术性能见表2.7-53。

表 2.7-53 NHR17 熔断器式隔离开关主要技术性能

约定自由空气发热电流(A)		160	250	400	630
额定工作 电流(A)	AC-21, AC-22(400V), AC-20(690V)	160	250	400	630
	AC-21/AC-22(690V)	100	200/160	315	425/315
操作力(N)		≤250	≤350	≤350	≤450
选配熔断体尺码号		00	1	2	3
熔断体额定电流(A)		20, 25, 32, 35, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160	80, 100, 125, 160, 200, 224, 250	125, 160, 200, 224, 250, 300, 315, 355, 400	315, 355, 400, 425, 500, 630
额定限制短路电流(kA)		100(400V)/50(690V)			

产品的外形尺寸见表2.7-54及图2.7-47。

续表

表 2.7-54 NHR17 熔断器式隔离开关安装尺寸 mm			
约定自由空气发热电流(A)	宽	高	深
160	123	186	90
250	196	266	118

约定自由空气发热电流(A)	宽	高	深
400	200	290	135
630	260	330	145

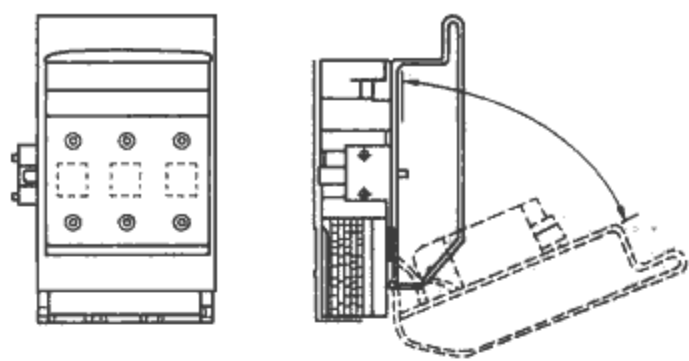


图 2.7-47 NHR17 熔断器式隔离开关外形

4 设计要点

开关、隔离器、隔离开关及熔断器组合电器品种繁多，用途也各有不同。某种结构稍作改变，即可增添其他功能。例如隔离开关用熔断器替代隔离刀可成为熔断器式隔离开关等。除原有的隔离开关功能外增加了熔断器功能。对于上述两种具有相同功能结构的电器，若符合 GB 14048.3 及 IEC 60947-3 标准的规定，可以减少重复试验。

(1) 设计者首先应了解下述相同功能结构的含义：

- 1) 载流部件的材料、涂层和尺寸相同，除接线端子的结构和熔断器连接方式不同外。
- 2) 触头的尺寸、材料、结构和安装方式相同。
- 3) 操作机构具有相同功能结构，其材料和物理性能相同。
- 4) 触头闭合和断开速度大体上相同。
- 5) 模塑材料和绝缘材料是相同的。
- 6) 灭弧装置的灭弧方法，材料和结构相同。

(2) 对于下述的差异，可以按简化试验程序进行考核：

- 1) 使用类别和工作电压。
- 2) 用于 50Hz 或 60Hz。
- 3) 3 极或 4 极电器（中性极可断开或不断开）。
- 4) 接线端子的多种结构。
- 5) 不同类型的操动器。
- 6) 不同型式熔体的熔断器触头座。

4.1 总体设计

(1) 总则。参阅表 2.7-1 选择适用的功能。若考虑设计的电器在结构上稍作改变可以有两个及以上的功能，则总体设计时应考虑上述相同功能结构的原则。

(2) 使用类别和工作电压的确定。使用类别根据电器的用途按表 2.7-2 选择。按需要可选择几个。工作电压的确定一般是按不同的使用类别及用途规定几个，使产品的使用对象可以更广泛一点。但是相应的额定工作电流确定时，应尽量使接通分断电流倍数高的使用类别规定的试验电流最大。此时就能满足在最高的额定工作电压、最大的试验电流、最小的功率因数及最高的操作次数下只需进行一套短路接通和分断及操作性能试验。

(3) 频率的确定。在我国产品一般用于 50Hz。若考虑出口需要，可以用于 60Hz 场合。按标准规定在 50Hz 下完成的试验被认为覆盖用于 60Hz。例外的是：电流大于 800A 的电器由于集肤效应的缘故，需再进行 60Hz 下温升试验；其次是带线圈的继电器和脱扣器的温升及操作性能需再进行 60Hz 下试验。在结构设计时应考虑到上述因素。

(4) 极数的确定：

1) 在 3 极电器上完成的试验被认为也覆盖中性极不断开的 4 极电器。因此中性极的设计只需考虑单相温升试验。

2) 在 4 个极可断开的电器上完成的试验被认为也覆盖了 3 个极可断开的电器，但应满足所有极相同，并且触头的闭合和断开速度大体上相同。因此中性极的设计及动作均应考虑上述因素。

(5) 熔断器底座触头的设计要素。熔断器式开关、熔断器式隔离器或熔断器式隔离开关设计成可安装于不同类型的熔断器底座触头时，应考虑每种类型的温升及额定限制短路电流下的耐受能力。

(6) 不同接线端子结构的设计要素。同一产品提供多种接线端子结构时，应考虑满足机械性能、温升及短时耐受电流（或熔断器保护的短路耐受能力）。对于直接插入母线上的接线端子的电器，还应考虑确保正常的插拔操作。

(7) 单极操作的三极开关设计。由 3 个单极开关组成的三极开关用于三相电路中，若允许一极一极分别操作，所产生的结果有两种严酷状态：

1) 其中二极闭合后，另一极接通及分断时电压均为 1.5 倍相电压。

2) 其中一极闭合、一极断开后，另一极接通时电压为 $\sqrt{3}$ 倍相电压，分断时电压为 $\sqrt{3}/2$ 倍相电压。

上述情况显然比三极同时接通分断严酷，设计时应考虑此情况。

(8) 熔断器熔断后故障显示及报警。目前许多带熔断器的开关电器采用电子技术进行检测其熔断故障，例如电子熔断器监测器等。由此带来的 EMC 考核在设计中必须加以考虑。

4.2 绝缘选择

对于具有隔离功能的产品，选择额定绝缘电压值应尽可能高一些，一般至少高于额定工作电压值。因此在相间和极间的结构设计中应考虑足够大的爬电距离，必要时可以加筋。在绝缘材料组别的选择上，不宜采用 III b 级，使产品的泄漏电流每极满足不大于 0.5mA (AC-20、DC-20) 或 2mA (其他使用类别) 要求，提高安全因素。

4.3 导电结构

4.3.1 触头设计

产品的触头材料一般选用紫铜或紫铜镀银。产品的安装防护等级一般较低，触头暴露在大气中，操作不频繁时，接触表面易于氧化和积集污垢，特别是裸铜或磨去镀层后的铜表面。因此设计中往往采取下述方法改善其接触：

(1) 有自清洗和自调整能力：在闭合过程中，相互接触的触头表面能相对摩擦，以清除污垢。此外能确保各接触点可靠接触。

(2) 有足够长度的接触范围：触头的接触范围应适应操作行程和触头磨损的变化。因此，触头的接触表面需有足够的长度（或超程），避免出现脱离接触或接触不良现象。

(3) 有可靠导向性能：动、静触头在闭合前的相对位置因机械松动等原因，可能出现较大的相对偏差，因此需要导向来使动触头顺利地进入静触头。

(4) 防止电弧烧伤正常接触表面，对开关类电器分闸时出现的电弧虽然较小，但也会烧伤触头的正常接触表面。因此应考虑加装灭弧室的同时，增加引弧措施（例如引弧片等）。

4.3.2 导电回路动热、稳定性

导电回路应考虑满足额定短时耐受电流 (I_{cw}) 值时的

动热稳定性要求。对于采用熔断器座作为静触头的结构，一般经验应控制其接触压力能满足表 2.7-55 要求。

表 2.7-55 触头间接触压力经验值

1s 额定短时耐受电流 (kA)	触头间接触压力 (N)
25	240~300
30	300~360
35	430~470
40	570~610
45	720~760
50	900~940

4.3.3 导电回路接线端子

导电回路接线端子的设计应满足在安装时应使外部导线容易进入并便于接线。接线端子紧固用螺钉和螺母除固定接线端子本身就位或防止其松动外，不应作为固定其他任何零部件之用。

4.4 机械机构

产品一般以手动方式进行操作。为提高触头闭合和断开速度，目前大多都采用无关人力操作和半无关人力操作方式的操动机构。此外，在结构设计时应考虑减少手动操作力，一般应满足表 2.7-56 规定的要求。

表 2.7-56 手动操作的最大操作力

手动操作方式	最大的操作力 (N)
按钮操作	50
单指操作	50
双指操作	67
双手操作	200

4.5 安装方式及接线方式

4.5.1 产品的安装方式应多样化

目前除用螺栓直接固定安装于底板上的固定式外，还有可直接安装在柜门面板上的固定式，见图 2.7-48。也有直接装在配电板上的固定式，见图 2.7-49。此外，有轨装式，见图 2.7-50，使用固定件产品可快速安装在导轨上。还有插入式，见图 2.7-51，被插入的汇流排厚度可以不同（例如 5mm 或 10mm），两相之间的距离也可以不同（例如 50mm 或 60mm 或 185mm 等）。

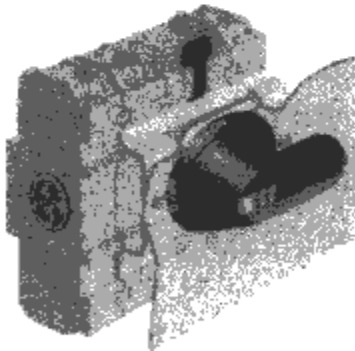


图 2.7-48 可直接安装在柜门面板上 OT 隔离开关的固定式

4.5.2 产品的接线方式应按不同需求而多样化

一般除母排或电缆直接按上下进出线连接或板后进出线连接外，可采取母排直接进线，见图 2.7-49，即产品三相进线端与相距一样的配电柜母排一头直接相连接，该电器设计时应考虑与配电柜相距匹配。此外，也有一种母排直接穿过产品底座，通过挂接端子将产品三相进线（或出线）分别挂接在不打孔的三相母排上，见图 2.7-52，从而达到快速无孔安装的目的。一般在设计挂接端子结构时，应考虑也可用于

矩形母排的挂接，使母线架的连接也可实现快速无孔安装（见图 2.7-29）。对于电缆的连接一般均采用 V 型线夹结构较多，除非小容量的产品，可采用压接式结构。

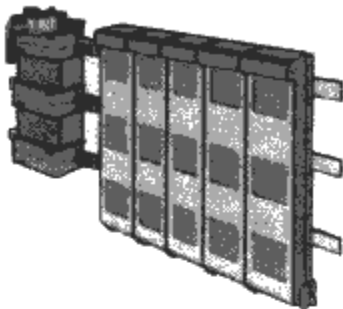


图 2.7-49 可直接装在带开关熔断器组底座配电板上的隔离开关固定式

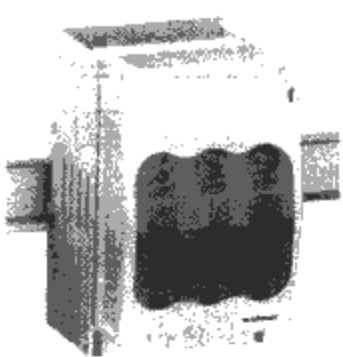


图 2.7-50 轨道安装的 NH 熔断器式隔离开关

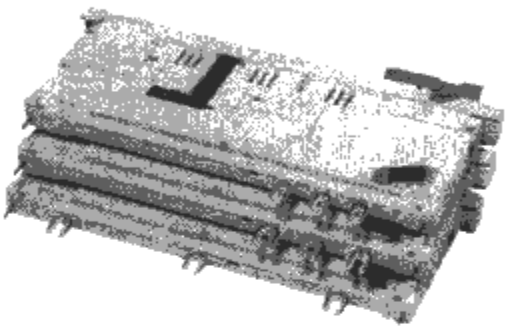


图 2.7-51 插入式安装的隔离开关熔断器组

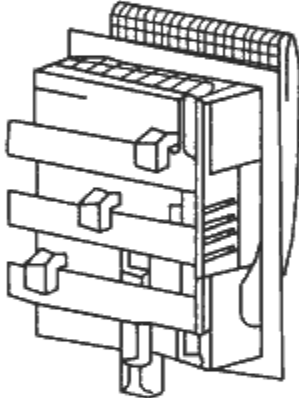


图 2.7-52 母排无孔连接

4.6 附件

产品的附件提供可方便用户使用，提高安全可靠。主要的附件有辅助开关、挂锁、电子熔断器监测器（EFM）、专用电流及电压表、相间隔板、电源插头和各种保护盖等。考虑附件的设计及安装时特别应满足下述要求来达到安全可靠。

- (1) 作电气联锁的辅助开关的触头和主极的触头断开之间的时间间隔应该足以确保在电器的主极断开之前有关的接触器或断路器断开电流。其时间间隔应不小于 20ms。接通操作时，辅助开关的触头应在主触头接通之后或同时接通。
- (2) 断开位置提供挂锁装置应设计成采用专用挂锁使其不能移动，以确保误操作时断开触头之间电气间隙仍能满足规定的要求。
- (3) 电子熔断器监测器应满足 EMC 规定的测试。

5 选用与维护

5.1 选用

5.1.1 低压开关、隔离器、隔离开关的选用

(1) 选用隔离器应仅作电源隔离之用，而不能带负载操作。若需带负载操作则应选用开关或隔离开关，而后者还有

作电源隔离之功能。

(2) 按供电电路要求选择相配的电器额定工作电压及额定工作电流。同时电器的使用类别应符合供电电路的典型用途(见表 2.7-2)。电动操作的控制电源一般选择 380V 及以下较适宜。

(3) 选用产品的额定短路接通能力、额定短时耐受电流(或额定限制短路电流)应能满足供电电路发生短路故障时的动、热稳定性要求。如与要求不符,应选择增大一级框架的产品,以满足该要求。

(4) 按供电柜体设计要求选择合适的操作方式,如正面手柄操作、正面杠杆操作、正面旋转操作或侧面操作等。

(5) 按设计要求参考样本选择必需的附件,例如手柄、附加转轴、辅助开关、端子罩、挂锁及相间隔板等。

(6) 组合开关的层数和接线图应符合供电电路要求。

5.1.2 熔断器组合电器的选用

(1) 若需要作电源隔离之用,应选择带隔离功能的熔断器组合电器。

(2) 产品的电性能及操作方式按 5.1.1 中 (2)、(3)、(4) 进行选择。

(3) 产品供货一般不包括熔断器。用户应按产品使用说明书要求选用符合 GB 及 IEC 有关标准的相应规格熔断器。

(4) 产品用于直接通断单台电动机场合时,熔断器的熔体额定电流应考虑电动机的起动条件。对起动时间不长的场合可按下式决定熔体的额定电流 I_N

$$I_N = I_d / (2.5 \sim 3) \quad (\text{A})$$

对起动时间长或较频繁起动(如吊车电动机起动)的场合,按下式决定熔体的额定电流 I_N

$$I_N = I_d / (1.6 \sim 2.0) \quad (\text{A})$$

式中: I_d 为电动机的起动电流(A)。

(5) 按设计要求参考样本选择安装方式(例如插入式或母排无孔连接等)及接线方式(例如 V 型线夹等)。

(6) 按设计要求参考样本选择必需的附件,例如手柄、附加转轴、辅助开关、端子罩、挂锁、相间隔板、电子熔断器监测器(EFM)、专用电流及电压表及电源插头等。

5.2 维护

5.2.1 低压开关、隔离器、隔离开关的维护

(1) 母排与接线端连接处,如有氧化膜应先清除,再涂上工业凡士林或导电膏后再进行连接,以防止氧化。

(2) 电动操作产品应按制造厂提供的电气原理图接线,之后将外壳接地。

(3) 产品损坏时需进行维修。或在定期检修进行维护时应清除底板上的灰尘,以保证良好的绝缘。检查触刀(触

头)的接触情况,如磨损严重应及时更换。发现松动应及时拧紧。

(4) 安装刀形开关时,应注意外接母排与产品接线端子相连时,不应存在较大的应力,使动、静触头保持在原设计位置,以保证可靠接触。在安装杠杆操动机构时,依靠调节连杆长度确保操作到位,并且灵活可靠。

(5) 产品在安装或维修后,用户在投入运行前应进行下列各项检查和试验:

1) 检查控制电路接线是否正确,特别需注意电源的相序,切实保证指示灯显示与产品动作一致,以免电气联锁装置失灵。

2) 检查电动操动机构(如有)是否灵活,润滑是否良好。

3) 检查触头接触是否良好及动作是否灵活。对插入式的触头结构应涂上 3 号钠基润滑脂(或导电膏)。

4) 检查外接母排连接接触是否良好。

5) 检查接地装置是否可靠。

6) 运行期间需保持清洁,并应作定期检修和润滑传动装置。

(6) 对具有联锁装置的产品,要注意保持手柄与门的联锁,不可轻易拆除。

5.2.2 熔断器组合电器的维护

除 5.2.1 中有关内容。可参照维护外,补充下述几点:

(1) 产品应垂直安装后才能投入正常运行。安装时一般需先将上盖撤下。操作时应装上熔断体。

(2) 熔断器式的开关电器转动部件必须经常保持清洁,以防止积污垢后操作不灵活。

(3) 更换熔断体时,应注意更换的熔断体的规格及型号是否满足使用说明书的要求以及原熔断体是否带熔断器撞击器。一般最好更换同型号同规格熔断体。

(4) 更换熔断体时,应断开负载电路。对熔断体安装在上盖上的产品,将产品上盖打开或撤出,操作人员应戴上工作手套,轻轻按动熔断体安装卡板下面的弹簧片,即可避免因熔管的高温而烫手,又可使更换的熔断体方便安全地从盖上取下,新的熔断体直接沿卡板槽口处推入即可。

(5) 应尽量避免不必要地拆装灭弧室,拆下后要妥为保管,使用前一定要小心装上,以免发生意外。

(6) 重新安装时,在外接母排与接线端连接处如有氧化膜应先清除,再立即涂上工业凡士林或导电膏后再进行连接,以防止氧化。

(7) 带电子熔断器监测器的产品在更换熔断体时应注意控制电路接线完整,以确保其正常工作。

第8章 低压熔断器

1 低压熔断器的用途和分类

低压熔断器（以下简称熔断器）是一种低压配电电器，在配电装置中起到保护电路及电器设备的作用，当电路发生过载或短路故障时能自动断开电路。熔断器自动断开电路是利用一金属丝或金属片，串联在被保护的电路中实现的，如图 2.8-1 所示。当电动机发生过载或短路故障时，金属丝便灼热而熔化，从而切断电路（现代绝大多数的熔断器都是利用金属熔化这一特点来切断电路的）。在切断电路的过程中往往会产生强烈的电弧，同时使灼热的金属蒸气向四周喷溅和发生爆炸声。为了安全和有效地熄灭电弧，通常把金属丝装在一个封闭的盒子或管子内组成一个整体。因此，一般熔断器的结构如图 2.8-2 所示。当熔断器断开电路后，需要取下外壳，重新更换新的金属丝或金属片，恢复原位才能接通电路继续使用。

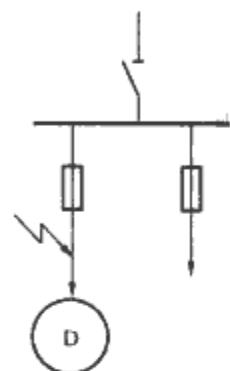


图 2.8-1 使用熔断器保护的电路

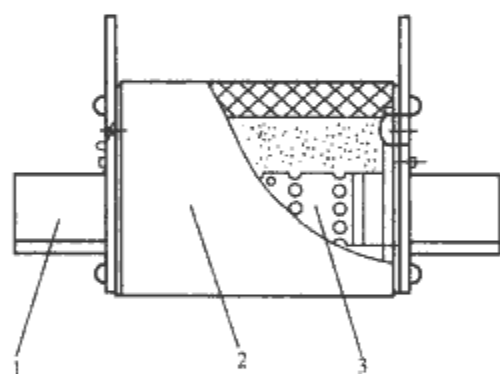


图 2.8-2 熔断器结构示意图
1—插头装置；2—外壳；3—熔体

熔断器的安装和维护简单，体积小，价格低廉，断流能力大，有些特殊结构的熔断器还具有切断时间短和限流效应大等优点，因此至今仍广泛用来作为过载或短路保护电器。

随着电力工业的不断发展，低压电力网络的容量也不断地增加，因此需要设计和制造额定电流大和开断能力强的各种配电保护电器，对于熔断器来说，也具有同样的要求。此外，近几年来由于大功率半导体元件（如晶闸管整流元件等）在电力工业中的广泛应用，还提出要求配合保护半导体元件特殊需要的各种快速熔断器。因此熔断器一般划分为专职人员使用的熔断器（主要用于工业的熔断器）、非熟练人员使用的熔断器（主要用于家用和类似用途的熔断器）和半导体设备保护用熔断体三大类。

另外，熔断器也可按照下列方式分类：

- (1) 按照开断电流的性质，可以分为有限流效应和无限流效应。
- (2) 按照外壳型式，可以分为开启式、半开启式和封闭式。
- (3) 按照填充材料，可分为有填充材料和无填充材料。
- (4) 按照动作时间，可以分为慢速的、快速的、快慢速

的和特快速的。

(5) 按接线方式，可以分为插入式、汇流排式、螺旋式。

2 低压熔断器结构与开断电流的工作原理

2.1 低压熔断器的结构

2.1.1 不带填料的封闭式熔断器

不带填料的封闭式熔断器主要由绝缘管和带有螺纹的两个金属帽组成，管内装以熔丝并与金属帽相连接，构成了一个全封闭式的熔断器。这种结构的熔断器开断短路电流时，就没有电弧向外喷出的现象。同时，管内的空气在电弧高温的作用下，由于气体的热膨胀，使管内压力大大增加，压力的增加使电弧强烈地收缩，加速了游离气体的再结合（即中和）和增加了热导率，能促使电弧的熄灭。

2.1.2 带有填料的封闭式熔断器

在低压电气装置中还广泛采用带有填料的封闭式熔断器。这种熔断器的填料为纯粹的石英砂细粒，填充在封闭的熔断管内和熔体的周围。当熔体熔化蒸发时，形成了灼热游离金属蒸气和质点，并迅速地扩散到石英砂填料细粒之间的空隙，与石英砂细粒表面接触，使灼热金属蒸气迅速凝结，结果游离质点和金属蒸气剧烈减少，于是加速了电弧的熄灭。

当过载电流通过石英砂熔断器时，对于采用细熔丝的熔断器 [如图 2.8-3 (a) 所示]，往往先在熔丝当中熔断，或者在冶金效应处先熔断，形成电弧，直到电流某一次过零时熄灭。对于采用变截面形状熔体的熔断器 [如图 2.8-3 (b) 所示]，过载状态下则在冶金效应处先熔断，形成电弧，直到电流某一次过零时熄灭。短路状态下则所有狭窄截面部分同时熔断，形成电弧，直到电流某一过零时熄灭。由于开断过程十分剧烈，在电弧的高温作用下，使金属蒸气迅速向其周围喷溅而深入到石英砂细粒中，并凝结在石英砂细粒上，同时迫使电流突然中断，下降到零。因此用石英砂填料的熔断器，在开断短路电流时，具有很大的限流作用，即在电流自然过零很早以前就被切断，而且有过较大的过电压。

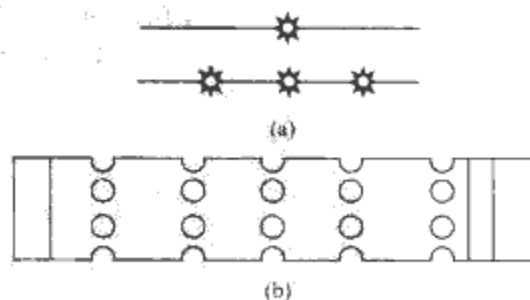


图 2.8-3 常用熔断器熔体形状图
(a) 丝状熔体；(b) 变截面状熔体

有填料的封闭式熔断器熔断时所产生的过电压与熔体的长度有关。熔体越长，所产生的过电压越高。对于熔断器填料的选择，试验结果表明，采用石英砂较为合适。若采用其他填料，如大理石粉和石膏粉等，在高温下会分解出气体，使封闭的熔断管内的压力剧烈地升高，当开断短路电流时，

会使管炸裂。同样，采用过细或过粗的石英砂粒子作为填料，效果也很差，当颗粒过细时，不容易使金属蒸气扩散到较深的区域；当颗粒过粗时，所留的空隙较大，空隙气体在热膨胀下所产生的压力过大，容易使管子炸裂。另外，装入熔断器的石英砂颗粒必须经过去铁、洗净和干燥处理。

有填料的封闭式熔断器在分断故障电流时，没有声光现象，也没有火焰等从熔断管内向外散出，因此大大简化了熔断器在配电设备上的装置，并提高了工作的安全性。为了判别熔断器是否熔断，常在熔断器的顶端装一个熔断指示器。当熔体熔断后，指示器借弹簧的作用力向外跳出。另一种方法是在熔断器的顶端（或中部）安装一个熔断撞击器。当熔体熔断后，撞击器借弹簧的作用力向外顶击，撞击推动微动开关，带动其他辅助电器动作，发出声、光等熔断信号。

2.1.3 非熟练人员使用的熔断器

非熟练人员使用的熔断器壳体一般由陶瓷制成，导电件触头由纯铜或黄铜制成，结构为封闭式。熔断器具有熔断指示器，熔断指示器涂有颜色标识，颜色按电流规格大小有不同的规定。熔断器额定电压至 500V，额定电流（A）有 2，4，6，10，13，16，20，25，35，40，50，63，80，100。额定电压至 240V 的熔断器，最小额定分断能力为 6kA；额定电压 240~500V 的熔断器，最小额定分断能力为 20kA。熔断器在正常使用条件下的防护等级至少为 IP2X，更换熔断器时防护等级可暂时降为 IP1X。在使用载熔件的场合，当载熔件从熔断器底座中取出或插入时，熔断器不应从载熔件中自行脱落。

非熟练人员使用的熔断器可分为 D 型熔断器 [如图 2.8-4（a）所示] 和圆管式熔断器 [如图 2.8-4（b）所示]。

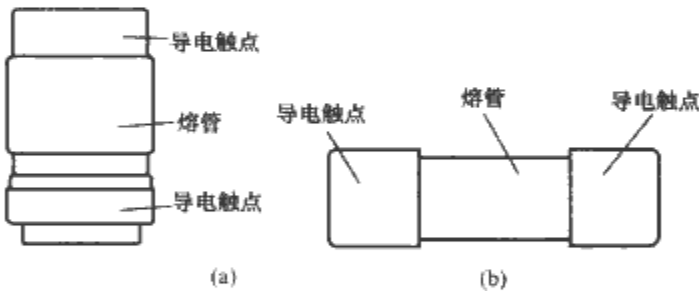


图 2.8-4 非熟练人员使用的熔断器外形图
(a) D 型熔断器；(b) 圆管式熔断器

2.2 熔断器开断电流的工作原理

当过载或短路电流通过熔断器时，熔断器的熔体瞬时产生大量的热量，使熔体从固态直接气化，于是电流中断。由于气化瞬时断开的间隙小，电位梯度很高，会使间隙击穿，产生电弧。对于不带填料的封闭式熔断器，是将熔体装在一个封闭的绝缘管内，绝缘管由高强度材料制成，并且这种材料（或在其内壁衬一层其他材料，如反白纸）在高温电弧下能分解出大量的气体，使管内产生很高的压力，用以压缩电

弧的电位梯度，以达到灭弧的目的；在带有填料的封闭式熔断器管内，在开断电路的过程中，高温的电弧和熔体的金属蒸气很快地扩散到绝缘砂粒的缝隙中，可达到熄灭电弧的作用。

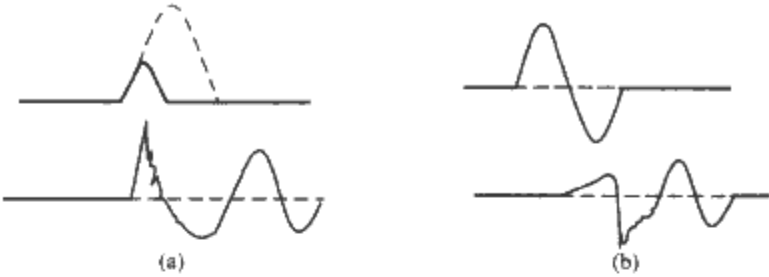


图 2.8-5 熔断器开断电流的波形图
(a) 限流熔断器开断电流的波形；
(b) 不限流熔断器开断电流的波形

在交流状态时，熔断器按照开断电流的性质可以分为限流和不限流的两种。所谓限流的熔断器是指当短路电流还未达到最大值 I_m 时，已完成气化、击穿、间隙产生电弧和熄灭电弧的过程，并将电流 i 突然下降到零，如图 2.8-5（a）所示为交流电流的开断情况。所谓不限流的熔断器是指电路中的电流将从 i 继续上升，如图 2.8-5（b）中的情况。短路电流将持续到第一次电流过零瞬时，熄灭电弧。有时短路电流还可能继续延到经过第二或第三次电流过零瞬间才熄灭电弧。

3 熔断器的基本参数和性能

额定电压——指熔断器开断电流后能长期承受的电压，一般来说等于（或大于）使用电气设备的额定电压。由于运行的低压电网根据国家标准规定允许 $\pm 10\%$ 电压的波动变化，因此所有的熔断器都应能承受比额定电压高 10% 的电压的能力。熔断器在作分断试验时所施加的试验电压为额定电压的 110%，不能超过额定电压的 115%。

我国用于低压电网的电力熔断器的额定电压（V）有 230，400，500，690，1140 电压等级；用于保护半导体整流元件的快速熔断器的额定电压（V）有 110，125，220，250，440，460，500，690，750，1000，1500 电压等级。

额定电流——指熔断器能长期通过的电流。确定额定电流的决定因素是熔体所用材料的温升。它的要求是使熔体在通过长期电流后不致使材料有显著老化的现象。对于银熔体温度应不超过 550°C ，对于铝熔体不应超过 350°C ，对于铜熔体不应超过 250°C ，对于其他低熔点材料，如锌合金之类不应超过 200°C 。

用于交流的熔断器，其额定电压是以额定频率下的正弦波交流电流的有效值为基准；用于直流的熔断器，其额定电压以稳定的平均值为基准。一般用途全范围分断能力的熔断体典型产品规格和参数见表 2.8-1，半导体设备保护用部分范围分断能力的熔断体典型产品规格和参数见表 2.8-2。

表 2.8-1 一般用途全范围分断能力的熔断体典型产品规格和参数

产品型号	额定电压 (V)	分断能力 (kA)	额定电流 (A)		安装型式
			熔断器	熔断体	
NT00C	AC 500	120	160	4, 6, 10, 16, 20, 25, 32, 35, 40, 50, 63, 80, 100	插入式
NT00 (RT16) (RT20)	AC 500	120	160	4, 6, 10, 16, 20, 25, 32, 35, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160	插入式
	AC 690	50			
	DC 250	100			
NT0	AC 500	120	160	4, 6, 10, 16, 20, 25, 32, 35, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160	插入式
	AC 690	50			
	DC 440	100			

续表					
产品型号	额定电压 (V)	分断能力 (kA)	额定电流 (A)		安装型式
			熔断器	熔断体	
NT1 (RT16) (RT20)	AC 500	120	250	32, 35, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 224, 250	插入式
	AC 690	50			
	DC 440	100			
NT2 (RT16) (RT20)	AC 500	120	400	100, 125, 160, 200, 224, 250, 300, 315, 400	插入式
	AC 690	50			
	DC 440	100			
NT3 (RT16) (RT20)	AC 500	120	630	200, 224, 250, 300, 315, 400, 425, 500, 630	插入式
	AC 690	50			
	DC 440	100			
NT4	AC 400	100	1250	800, 1000, 1250	插入式
NT4a			1600	800, 1000, 1250, 1500, 1600	
STR13 (NT3)	AC 400	100		800	插入式
RT0-100	400	100	100	30, 40, 50, 60, 80, 100	插入式
RT0-200			200	80, 100, 120, 150, 200	
RT0-400			400	150, 500, 250, 300, 350, 400	
RT0-600			600	350, 400, 450, 500, 550, 600	
RT0-1000			1000	700, 800, 900, 1000	
RT14-20	400	100	20	2, 4, 6, 10, 16, 20	插入式
RT14-32			32	2, 4, 6, 10, 16, 20, 25, 32	
RT14-63			63	10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63	
RT914-20	500	50	20	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 16, 20	插入式
RT914-32			32	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 16, 20, 25, 32	
RT914-63			63	10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63	
RT30-20	400	20	20	2, 4, 6, 10, 16, 20	插入式
RT30-32			32	2, 4, 6, 10, 16, 20, 25, 32	

表 2.8-2 半导体设备保护用部分范围分断能力的熔断体典型产品规格和参数

产品型号	额定电压 (V)	分断能力 (kA)	额定电流 (A)	安装型式
NGT00	AC 400 AC 800	100	25, 32, 35, 40, 50, 63, 80, 100, 125	螺栓连接式
NGT1	AC 400 AC 690 AC 1000	100	100, 125, 160, 200, 250	螺栓连接式
NGT2	AC 400 AC 690 AC 1000	100	200, 250, 280, 315, 355, 400	螺栓连接式
NGT3	AC 400 AC 690 DC 1000	100	355, 400, 450, 500, 560, 630	螺栓连接式
NGTB2	AC 400 AC 690 AC 1000	100	200, 250, 280, 315, 355, 400	螺栓连接式
NGTB3	AC 400 AC 690 AC 1000	100	355, 400, 450, 500, 560, 630	螺栓连接式

续表				
产品型号	额定电压 (V)	分断能力 (kA)	额定电流 (A)	安装型式
NGTC00	AC 400 AC 800	100	25, 32, 35, 40, 50, 63, 80, 100, 125	插入式
NGTC1	AC 400 AC 690 AC 1000	100	100, 125, 160, 200, 250	插入式
NGTC2	AC 400 AC 690 AC 1000	100	200, 250, 280, 315, 355, 400	插入式
NGTC3	AC 400 AC 690 AC 1000	100	355, 400, 450, 500, 560, 630	插入式
RST1	AC 1000	100	630, 710, 800	螺栓连接式
			800, 1000, 1250	
			1250, 1600, 2000	
RST3	AC 500	120	63, 80, 100, 125, 160, 200, 250	螺栓连接式
			250, 300, 350, 400	
			450, 500, 600, 700, 800	
			800, 900, 1000, 1200	
RST4	AC 800	50	63, 80, 100, 125, 160, 200, 250	螺栓连接式
			250, 300, 350, 400	
			450, 500, 600	
			700, 800, 900, 1000	
RST10	AC 690	50	200, 250, 315, 350, 400, 450	螺栓连接式
			400, 450, 500, 550, 630, 710, 800	
			500, 550, 630, 710, 800, 900, 1000, 1100, 1250	
RST11	AC 1000	100	1500 2000	螺栓连接式
RST12	AC 1400	25	800	螺栓连接式
RST16	AC 500 AC 800	100	3600	螺栓连接式
STF1	AC 1500 DC 750	50	900	螺栓连接式
STF2	AC690	100	800	插入式
RS4	AC 200	160	1000	插入式
	AC 250	160	450, 700, 800, 1600, 2300	螺栓连接式
	AC 400	160	1000, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1800, 2000, 2100, 2300, 3200, 4000, 4600	
	AC 500	160	10, 15, 20, 25, 30, 50, 60, 70, 80, 100, 130, 150, 200, 250, 300, 320, 350, 400, 450, 480, 500, 600, 630, 700, 750, 800, 1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 2000, 2200, 2250, 2300, 2500, 3200, 4000, 4400, 4600	
	AC 800	240	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100, 130, 150, 200, 250, 300, 320, 350, 400, 450, 480, 500, 600, 630, 700, 750, 800, 1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 2000, 2200, 2250, 2300, 3200, 4000, 4400, 4600	
	AC 1000	240	50, 60, 320, 500, 630, 650, 700, 750, 900, 1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 2000, 2100, 2250, 2300, 3200, 4000, 4600	

额定功率损耗——指熔断器在额定电流下的功率损耗。熔体材料的电阻温度系数对功率损耗有较大的影响。在热态下的额定功率损耗往往比在冷态下的额定功率损耗要大 1/3 左右，所以采取有效的冷却措施不仅可以改善散热，同时有利于降低功率损耗。用于中频电路的快速熔断器，为了降低其功率损耗，应尽量避免在熔断器上使用铁部件。

分断能力——指熔断器能在故障条件下可靠地分断过载（或短路）电流的能力。根据我国国家标准规定应能在规定的功率因数下，具有分断从额定电流的 2 倍开始直到极限分断电流的能力，且在分断过程中不应出现喷弧等现象，分断后的熔断器触头间的绝缘电阻应达到规定值。

极限分断能力是指熔断器能分断的最大电流的能力，对于电力熔断器，根据不同的需要有 2kA、5kA、20kA、25kA 和 50kA 等 5 个等级；对于快速熔断器有 25kA、50kA 和 100kA 等 3 个等级。

用于交流的限流熔断器，在进行极限分断能力试验时，如分断电流的瞬间值小于预期电流周期性分量的有效值时，应重新进行减小预期电流的分断能力试验，减小电流的数值可以根据下式精确地计算出来

$$I_2 = 0.7 i_1^{1.5} / I_1^{0.5}$$

式中： I_2 为减少的预期电流值； i_1 为开断电流瞬时值； I_1 为预期电流有效值。

用于直流的限流熔断器，如实际分断电流小于预期电流的 60%，则应重新进行较小的预期电流小的开断能力试验。这个预期电流应该选择得使熔断器的分断电流值大于预期电流值的 60%，小于 80%，它可以根据下式精确地计算出来

$$I_2 = 0.7 i_1^{1.5} / I_1^{0.5}$$

式中： I_2 为减少的预期电流值； i_1 为实际开断电流值； I_1 为预期电流值。

熔化时间/电流特性——指熔断器熔化时间与电流的关系曲线，也称作保护特性曲线。它是用来判断熔断器是否能满足选择性保护要求的依据。制造厂都应提供完整的熔化时间/电流特性曲线，如图 2.8-6 所示。

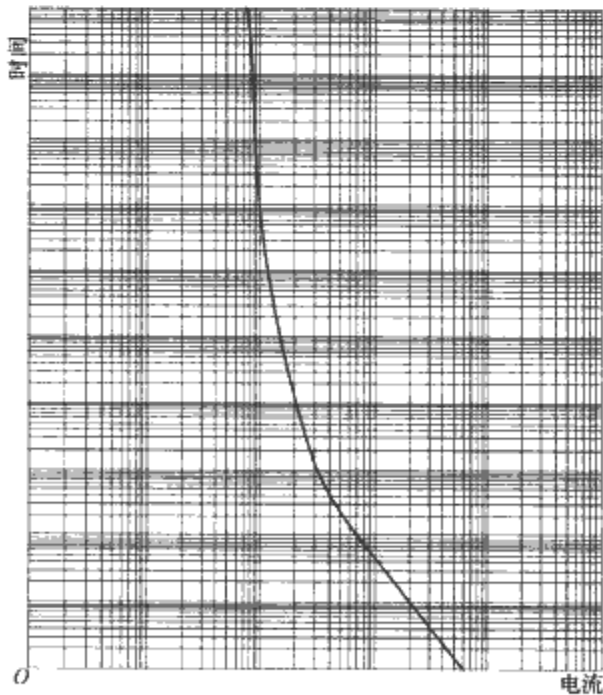


图 2.8-6 熔断器熔化时间/电流特性曲线

允通能量——是熔断器性能的一个重要参数，通常用 $\int i^2 dt$ 来表示，它随着预期电流的增大而增大，随着功率因数的增大而减少。

限流特性——指有限流作用的熔断器，在分断一定过载电流至极限分断电流时，其分断电流的峰值与相应的预期电

流之间的关系，如图 2.8-7 所示。

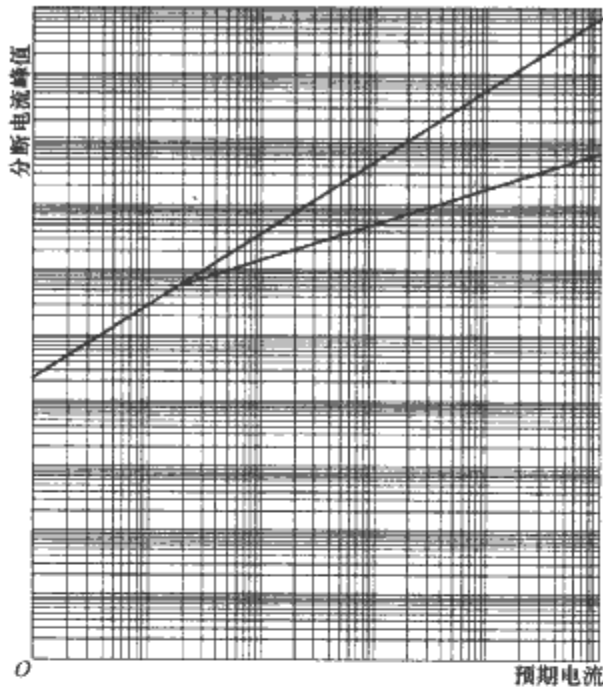


图 2.8-7 熔断器分断电流的峰值与相应的预期电流特性曲线

4 低压熔断器的设计要点

4.1 概述

低压熔断器设计的主要内容有：

- (1) 熔体形状和尺寸的确定。包括三个方面：①保护特性的计算；②最小熔化电流的计算；③在额定电流下，熔体温升的计算。
- (2) 熔断管结构和材料的选定。包括管子温升的计算和电弧能量和压力计算。
- (3) 触刀、夹座、底板、指示板、指示器及其他零件的计算。包括：①触刀、夹座、底板以及其他零部件的设计；②触刀与夹座在额定电流下的温升计算；③触刀与夹座在短路电流下的热稳定 and 动稳定计算；④指示器的结构。

低压熔断器在设计时应考虑的因素有：

- (1) 熔体尽可能采用高熔点和电导率的材料，例如用银、铜或铝。
 - (2) 熔体在正常工作状态下的温度宜选择得较低（最高部分的温度银一般不超过 550℃，铜不超过 250℃，铝不超过 300℃）。
 - (3) 熔体与连接板间的结合必须良好、可靠，接触电阻要尽可能小。
 - (4) 熔体的尺寸偏差必须控制在允许范围内，一般是测量最后装配好的熔断器的冷态电阻值来检查偏差的范围。
- 必须指出，保护特性、温升、热稳定、允通能量和压力计算等都需经过试验的考核来证实是否达到设计要求。

4.2 熔体的形状和尺寸的确定

熔体的形状大致可以分为两种：一种是截面为圆的均匀丝状或截面为矩形的带状；另一种为变截面的形状，如图 2.8-8 所示。它们的具体尺寸主要决定于保护特性的要求以及电压的大小和性质。

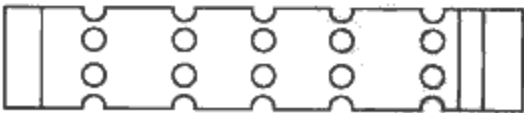


图 2.8-8 变截面的形状

4.2.1 熔断器保护特性的计算

熔断器的保护特性是指开断时间与电流的关系曲线。当熔断器通过的电流越大，则开断的时间越短；反之，电流越小则开断时间越长。为了进一步研究它们的关系曲线，可以通过发热理论来分析和推导。

熔体的开断时间主要由熔化时间和燃弧时间两部分组成。熔化时间是指从电流通入熔体起到熔体气化出现电弧瞬间的一段时间；而燃弧时间是指气化瞬时产生电弧到电弧熄灭的一段时间。

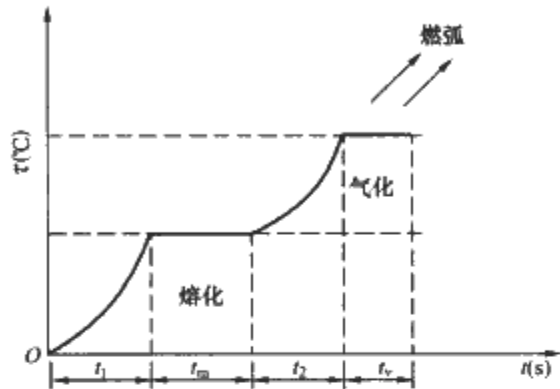


图 2.8-9 熔体熔断过程

熔体的熔化时间可以以图 2.8-9 所示的各个阶段时间来表示： t_1 为从起始温度到熔化点的时间， t_m 为熔化期内的时间， t_2 为金属完全熔化到气化点的时间， t_v 为开始局部气化到全部气化的时间。下面分别讨论这些时间的计算。

(1) 从起始温度到熔化点的时间计算。设 i 和 r 分别为通过熔体的电流和熔体的电阻， γ 为熔体单位体积的热容量， μ 为熔体材料的体积；于是熔体的温升 τ 对时间的变化可用下列微分方程式来表示

$$\gamma \mu d\tau/dt = i^2 r \tag{2.8-1}$$

把熔体的体积和电阻用熔体的长度 L 、截面积 a 和电阻率 ρ 来表示，上式便可写成下面的形式

$$\gamma L a d\tau/dt = i^2 \rho L/a \tag{2.8-2}$$

因为电流密度 $J=i/a$ 所以上式可简化为

$$\gamma d\tau/dt = J^2 \rho \tag{2.8-3}$$

如果将该方程式移项整理，可改写成

$$(\gamma/\rho) d\tau = J^2 dt \tag{2.8-4}$$

由于电阻率 ρ 随着温度接近线性规律变化，用 ρ_0 表示在 20℃ 时的起始电阻率， α 表示电阻温度系数，则

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \tau) \tag{2.8-5}$$

若略去 γ 对温度微量变化的影响，将式 (2.8-5) 代入式 (2.8-4)，并进行积分可得到

$$\int J^2 dt = (\gamma/\rho_0) \int d\tau/(1 + \alpha \tau) = (\gamma/\rho_0) \ln(1 + \alpha \tau_m) \tag{2.8-6}$$

从式 (2.8-6) 可知，若知道了熔体材料的有关参数，其中包括它的熔点 τ_m ，并知道了电流的性质，就可计算出从起始温度到熔化点的时间。

(2) 熔化期内的时间计算。当熔体的温度达到熔点时，熔体就开始变成液态，但全部熔化需要一些时间，下面叙述如何决定这一时间。

设熔体的体积素 dv 是在时间素 dt 内变成液态。令 h 为熔体材料单位体积的溶化潜热，因此，熔体熔化的体积与时间的关系可由以下微分方程式表示

$$h dv/dt = i^2 r \tag{2.8-7}$$

全部熔化时间为

$$h v = \int i^2 r dt \tag{2.8-8}$$

式 (2.8-8) 亦可写成如下形式

$$h L a = \int (i^2 \rho L/a) dt \tag{2.8-9}$$

式中： L 为熔体的长度； a 为熔体的截面； ρ 为熔体的电阻率。

由于熔化金属在熔化温度时的电阻率要比未熔化时的大得多，因此引入熔化期内的平均电阻率 ρ_m ($\rho_m = 2/ [1/(\rho_1 + \rho_2)]$)， ρ_1 为在熔化点时固态金属的电阻率， ρ_2 为在气化点时液态金属的电阻率，这样上式经过整理可写成

$$h/\rho_m = \int J^2 dt \tag{2.8-10}$$

从式 (2.8-10) 中可以看出，在电流变化的条件下经过积分就可以算出熔化期内的时间。

(3) 从金属完全熔化到气化点的时间计算。液态金属在短时间内仍保持着它原有的形状，因此，电流可以继续通过熔体对它加热，同时熔体的电阻率按液态电阻率 ρ_2 成线性规律变化，即

$$\rho = \rho_2 (1 + \beta \tau_2) \tag{2.8-11}$$

式中： β 为液态金属的电阻温度系数。

把式 (2.8-4) 代入式 (2.8-11)，可得到一个与方程式 (2.8-6) 相同形式的解

$$\int J^2 dt = (\gamma/\rho_2) (1/\beta) \ln(1 + \beta \tau_{2v}) \tag{2.8-12}$$

上式的求解必须知道气化点和熔化点间的温度差 τ_{2v} 。

为了求解从起始温度到气化点瞬间的时间，可以将式 (2.8-6)、式 (2.8-10)、式 (2.8-12) 相加

$$C = \sum \int J^2 dt = (\gamma/\rho_0 a) \ln(1 + \alpha \tau_m) + h/\rho_m + (\gamma/\rho_2 \beta) \ln(1 + \beta \tau_{2v}) \tag{2.8-13}$$

对于不同熔体材料，可以计算出不同常数 C ，表 2.8-3 列出了铜、银、铝三种材料的有关参数。表 2.8-4 列出了这三种熔体材料计算结果的常数值。

从表 2.8-4 可见，银的 C 值只是铜的 2/3，因而作为快速熔体材料，银比铜优越。

熔体完成气化也是需要一些时间的，在此期间需要供给一定的气化潜热，至于熔体的气化具体时间的计算是比较困难的，因为在气化的后期可能发生金属气体压力下的爆炸，已可略去不计。

表 2.8-3 铜、银、铝三种材料的有关参数

常 数	铜	银	铝
在 20℃ 时的起始电阻率 ρ_0 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	1.7×10^{-6}	1.64×10^{-6}	2.86×10^{-6}
在熔化点时固态金属的电阻率 ρ_1 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	10.2×10^{-6}	8.4×10^{-6}	12.4×10^{-6}
在气化点时液态金属的电阻率 ρ_2 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	21.3×10^{-6}	16.6×10^{-6}	25×10^{-6}

续表			
常 数	铜	银	铝
在熔化阶段中的电阻率 ρ_m ($\Omega \cdot \text{cm}$)	13.8×10^{-6}	11.2×10^{-6}	4.23×10^{-6}
固态金属的电阻温度系数 α ($1/^\circ\text{C}$)	4.39×10^{-3}	4.42×10^{-3}	4.23×10^{-3}
液态金属的电阻温度系数 β ($1/^\circ\text{C}$)	0.38×10^{-3}	0.71×10^{-3}	0.39×10^{-3}
熔化点和起始温度 (20°C) 间的温度差 τ_m ($^\circ\text{C}$)	1063	940	648
气化点和起始温度 (20°C) 间的温度差 τ_v ($^\circ\text{C}$)	2280	1930	2250
气化点和熔点间的温度差 τ_{2v} ($^\circ\text{C}$)	1217	990	1620
每单位体积的热容量 γ [$\text{W} \cdot \text{s}/(^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^3)$]	3.76	2.60	2.8
每单位体积的熔化潜热 h [$\text{W} \cdot \text{s}/(^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^3)$]	1833	1139	1040

表 2.8-4 铜、银、铝三种材料计算结果的常数值			
加热阶段	铜	银	铝
从起始温度到熔化点 [式 (2.8-6)]	5.63×10^8	5.91×10^8	3.14×10^8
熔化期内 [式 (2.8-10)]	1.33×10^8	1.02×10^8	0.63×10^8
从金属完全熔化到气化点 [式 (2.8-12)]	4.76×10^8	1.07×10^8	0.65×10^8
$C = \sum J^2 dt$ [式 (2.8-13)]	11.72×10^8	8.00×10^8	4.42×10^8

下面进一步研究在不同性质电流下计算熔化时间的方法，或者是在给定熔化时间内，计算电流的数值。

(1) 对称交流电流。当过载电流或短路电流中没有非周期分量时，电流将按时间的正弦函数变化，在这一情形中，电流密度为

$$J = J_e \sqrt{2} J_e \sin \omega t \tag{2.8-14}$$

式中： J_e 为电流密度的有效值； ω 为电流密度的角频率。

电流密度平方对时间的积分等于

$$\int J^2 dt = 2J_e^2 \int \sin^2 \omega t dt = J_e^2 [t - (\sin 2\omega t)/2\omega] \tag{2.8-15}$$

当时间 t 比电流的周期小得多，即 $t \ll 1/\omega$ 时，可以只取到式 (2.8-15) 中正弦函数展开成级数后的第二项，即

$$\int J^2 dt = 2J_e^2 (\omega t)^3 / 3\omega \tag{2.8-16}$$

在给定电流密度下从上式可求得熔化时间，在给定熔化时间内可求得熔化电流密度值

$$t = \sqrt{3C/2(\omega J_e)^2} \tag{2.8-17}$$

$$J_e = \sqrt{3\omega C/2(\omega t)^3} \tag{2.8-18}$$

(2) 不对称交流电流。若在设计范围内（时间不大于 $1/2$ 周期），非周期性分量的衰减略去不计，则不对称的交流电流可按对称的正弦函数变化曲线向上移到等于电流密度幅值 ($J_e \sqrt{2}$) 处，并按余弦函数变化的曲线来表示。在这种情况下，电流密度为

$$J = \sqrt{2} J_e (1 - \cos \omega t) \tag{2.8-19}$$

因而电流密度平方对时间的积分等于

$$\begin{aligned} \int J^2 dt &= 2J_e^2 \int (1 - 2\cos \omega t + \cos^2 \omega t) dt \\ &= 2J_e^2 [3t/2 - (2\sin \omega t)/\omega + (\sin 2\omega t)/4\omega] \end{aligned} \tag{2.8-20}$$

当时间 t 比电流的周期小得多时，即 $t \ll 1/\omega$ 时，则可取到式 (2.8-20) 中正弦函数展成级数后的第三项，而把式 (2.8-20) 写成以下形式

$$\int J^2 dt = J_e^2 (\omega t)^5 / 10\omega \tag{2.8-21}$$

上式中只含有时间的五次方，因而电流的加热首先进行

得很慢，但后来则增加得很快。

从上式在给定电流密度下可求得熔化时间，在给定熔化时间内可求得熔化电流密度值

$$t = \sqrt[5]{10C/(\omega J_e)^2} \tag{2.8-22}$$

$$J_e = \sqrt[4]{10\omega C/(\omega t)^5} \tag{2.8-23}$$

熔体熔化后随即产生电弧和熄灭电弧的过程，这一过程很难用理论和计算的方法来研究。

从试验得知，对于无填料的熔断器，一般均在生产电弧后第一次电流过零时熄灭，因此燃弧时间将等于或小于 10ms；对于有填料的限流熔断器，由于其具有强烈的限流作用，特别在开断短路电流时，燃弧时间往往小于 5ms。

4.2.2 最小熔化电流的计算

熔体最小熔化电流可以根据热平衡方程式求得

$$I_{\min}^2 R = \mu S \tau_m = \mu c l \tau_m \tag{2.8-24}$$

整理得

$$\begin{aligned} I_{\min} &= \sqrt{\mu c l \tau_m / R} = \sqrt{\mu c l \tau_m / (\rho l / \alpha)} = \sqrt{\mu c \tau_m / \rho} \\ &= \sqrt{\mu \tau_m / \rho} \sqrt{c \alpha} \end{aligned} \tag{2.8-25}$$

式中： I_{\min} 为最小熔化电流，A； μ 为在温升为 τ_m 时的散热系数； c 为熔体的周长，mm； l 为熔体的长度，mm； α 为熔体的截面积， mm^2 ； R 为熔体的电阻， Ω ； ρ 为熔体在 τ_m 温升时的电阻系数； S 为熔体的散热面积， mm^2 ； τ_m 为熔化时的温升，即材料熔点减去室温， $^\circ\text{C}$ 。

当熔体为圆截面时，式 (2.8-25) 可写成

$$I_{\min} = (\pi/2) \sqrt{\mu \tau_m / \rho} \times d^{1.5} = k_2 d^{1.5} \tag{2.8-26}$$

式中： d 为圆截面熔体的直径，mm； k_2 为常数。

常数 k_2 与熔体材料有关，可由表 2.8-5 查得，实际上公式 (2.8-26) 还与线径的大小有关。根据实践经验，在某些线径范围内推荐用下列经验公式计算。

对于线径 0.02~0.2mm 的熔体

$$I_{\min} = (d - 0.05) / k_1 \tag{2.8-27}$$

对于线径大于 0.2mm 的熔体

$$I_{\min} = k_2 d^{1.5} \tag{2.8-28}$$

式中： k_1 、 k_2 为系数，对于处在空气中的熔体可以从表 2.8-5 中查得。

表 2.8-5 常见熔体材料的 k_1 、 k_2 系数

熔体材料	系数	
	k_1	k_2
铜	0.034	80.0
银	0.031	68.9
铅	—	10.8
铝	—	59.1
锌	—	14
锡	—	12.8
铜镍合金 3:2	—	44.4
铅锡合金 2:1	—	10.8

对于埋在石英砂中线经 0.1~0.5mm 的铜熔体

$$I_{min} = 78d^{1.2} \tag{2.8-29}$$

对于埋在石英砂中线经 0.1~0.5mm 的铜熔体，带有锡球时

$$I_{min} = 5.2d^{1.2} \tag{2.8-30}$$

对于截面为均匀的矩形铜熔体处在空气中时（适用范围 $\delta=0.1\sim0.5$ ， $B=5\sim10$ ）

$$I_{min} = 150B\delta^{0.5} \tag{2.8-31}$$

式中： δ 为熔体的厚度，mm； B 为熔体的宽度，mm。

对于变截面熔体的最小熔化电流，是根据变截面熔体的几何尺寸计算出等效电阻来确定的。

熔断器的额定电流是以最小熔化电流为依据，然后根据被保护的系统要求，将最小熔化电流除以大于 1 的系数 k_3 来确定的，即

$$I_N = I_{min}/k_3$$

系数 k_3 有时叫做“熔化系数”，表 2.8-6 列出了常见材料熔体系数选择的范围。

4.2.3 熔体长度的确定

低压熔断器熔体的长度与额定电压的大小有关，但主要决定于熔断管的结构，往往由于结构上的原因，包括为了改善保护特性等其他原因，使熔体的长度比实际所需的长度要长得多。

对于一般封闭管式熔断器，熔体长度可按下式估算

$$L = 15 + (0.01 \sim 0.035)U_N \tag{2.8-32}$$

式中： U_N 为熔断器的额定电压，V。

对于用石英砂作填料，截面为圆形的熔体，其最短长度可由以下经验公式计算

$$L = 15 + 0.0U_N \tag{2.8-33}$$

表 2.8-6 常见材料熔化系数选择范围

熔体材料	熔化系数 (k_3)
铜	1.6~2
银	1.15~1.6
铜（带有锡球）	1.4~1.5
锌和铅	1.25~1.45
易熔合金	1.15~1.3

对于用石英砂作填料的变截面熔体，如图 2.8-10 所示，熔体的长度由断口数（即狭窄颈数）决定。断口数与额定电压有关，额定电压越高，要求断口数越多。增多断口数的目的是为了使得电弧熄灭后，平分在各断口上的恢复电压有所减轻，以便使电弧熄灭后不致重燃。但断口数的增加势必增加电弧的总能量，同时在熄弧的瞬间过电压也相应增大，因此

合理地选择断口数目是很重要的。实践证明，每个断口上最大可能承受的电压一般可以选取在 200~250V 范围内，而且与断口部分的几何尺寸及形状有关。根据现有结构，熔体的最短长度可按下式估算

$$L = 20 + (12 \sim 15)n \tag{2.8-34}$$

式中： n 为断口数。

在设计要求上希望熔断器熔体的长度尽可能短，这样不但有利于降低熔断器在开断电流过程中的过电压，同时在改善传热、散热和缩小熔断器的外形尺寸方面也起到很大作用。

4.2.4 熔体温升的计算

熔断器在正常工作状态下所产生的热量，一部分是通过热传导作用把热量向触刀部分传导，然后散到四周；另一部分是通过与熔体紧靠的介质传导（有时对流）到熔断器的绝缘外表面，然后散到四周。熔断器熔体上的温度分布是很不均匀的。如图 2.8-10 所示为熔体的温升分布分析图。一般来说，熔体最高点的温升比平均温升高 50% 左右。

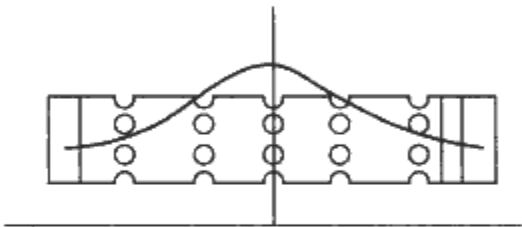


图 2.8-10 熔体的温升分布分析图

若已知熔断器的绝缘外表面的散热状态，熔体的温升可按下列步骤推导。

当熔断器达到稳定温升状态时，熔断器外壳表面的温升按热平衡原理可写成以下方程式

$$KW = \mu S\tau \tag{2.8-35}$$

式中： K 为分配系数，熔体产生总热量中所占的百分比； W 为熔体产生的热量（ I^2R ），W； μ 为散热系数； S 为散热表面积， cm^2 ； τ 为外壳表面的温升， $^{\circ}\text{C}$ 。

熔体的平均温升为

$$\tau_{aw} = \tau + \Delta\tau \tag{2.8-36}$$

式中： $\Delta\tau$ 为在绝缘中的温度差。

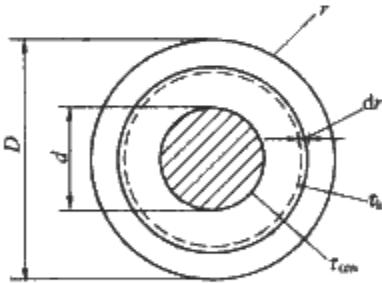


图 2.8-11 圆形截面分析图

对于熔体为圆形截面，熔断管为圆形截面的熔断器， $\Delta\tau$ 可参照图 2.8-11 中 $\int dr$ 决定。当 KW 为常数时，在绝缘管中取半径为 x 与 $x + \Delta x$ 的圆薄层，其温升为 τ_x ，管长为 l ，则热流方程式为

$$KW = -\lambda 2\pi x d\tau_x / dx \tag{2.8-37}$$

$$d\tau_x = -KW dx / 2\pi \lambda x \tag{2.8-38}$$

式中负号表示热流是从高温到低温度。

$$\Delta\tau = \int_{\tau_{aw}}^{\tau} (-d\tau_x) \int_{d/2}^{D/2} KW dx / 2\pi \lambda x = (KW / 2\pi \lambda) \ln(D/d) \tag{2.8-39}$$

于是熔体的温升为

$$\tau_{aw} = KW / \mu S + (KW / 2\pi \lambda) \ln(D/d) \tag{2.8-40}$$

熔体为变截面时；
如图 2.8-12 (a) 所示的布置，可按下式计算

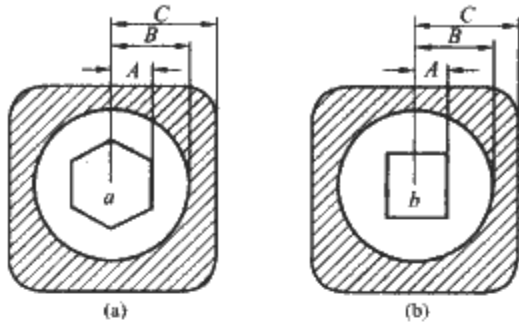
$$\tau_{\text{ow}} = KW/(\mu s) + [KW/(7\lambda_1 l)]\ln(B/A) + [KW/(7\lambda_2 l)]\ln(C/B) \tag{2.8-41}$$


图 2.8-12 变截面形截面分析图
(a) 布置 1; (b) 布置 2

如图 2.8-12 (b) 所示的布置，可按下式计算

$$\tau_{\text{ow}} = KW/(\mu s) + [KW/(8\lambda_1 l)]\ln(B/A) + [KW/(8\lambda_2 l)]\ln(C/B) \tag{2.8-42}$$

【例 8-1】已知熔断器达到稳定温升状态的功率损耗为 86W (即热态时的功率损耗)，熔断器的布置如图 2.8-12 (a) 所示。图中， $A=1.5\text{cm}$ ， $B=2.5\text{cm}$ ， $C=3.2\text{cm}$ ，填料为石英砂，导热系数 $\lambda_1=100\times 10^{-4}\text{W}/(\text{℃}\cdot\text{cm})$ ，外壳为陶瓷，导热系数 $\lambda_2=105\times 10^{-4}\text{W}/(\text{℃}\cdot\text{cm})$ ，陶瓷外壳周长为 24.5cm，长度为 $l=6\text{cm}$ ，设 $K=50\%$ ，散热系数 $\mu=(12\sim 14)\times 10^{-4}\text{A}/(\text{cm}^2\cdot\text{℃})$ 。

解 陶瓷表面的平均温升为

$$\tau = KW/(\mu s) = [(0.5 \times 86)/(13 \times 10^{-4} \times 24.5 \times 6)]\text{℃} = 230\text{℃}$$

熔体的温升为 [为了简化起见 $\lambda_1 = \lambda_2 = 103 \times 10^{-4}\text{W}/(\text{℃}\cdot\text{cm})$]

$$\begin{aligned} \tau_{\text{ow}} &= \tau + [KW/(7\lambda_1 l)]\ln(C/A) \\ &= [230 + [(0.5 \times 86)/(7 \times 6 \times 103 \times 10^{-4})]\ln(3.2/1.5)]\text{℃} \\ &= (230 + 99.5 \times 0.756)\text{℃} = (230 + 75)\text{℃} = 305\text{℃} \end{aligned}$$

5 低压熔断器的选用

低压熔断器不但应用于电力系统低压配电设备中，更广泛应用于机床制造、化工、冶金、煤矿以及地铁和电气化铁路等各行各业，作为电气设备过电流保护。因此，针对不同的行业用途，如何来合理选用不同类型的低压熔断器就显得非常重要。图 2.8-13、图 2.8-14 所示波形反映了熔断器在分断故障电流时电压和电流的变化过程。

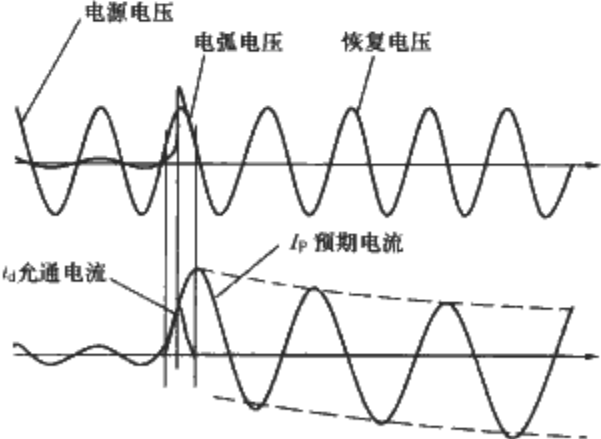


图 2.8-13 熔断器分断故障
电流时电压和电流波形

5.1 低压高分断能力熔断器

目前，国内企业生产的低压高分断能力熔断器的型号主要有上海电器陶瓷厂有限公司生产的 NT 系列低压高分断能

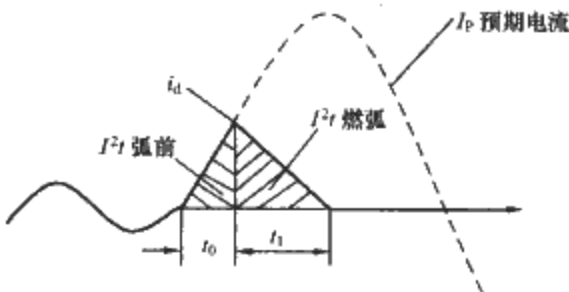


图 2.8-14 熔断器分断故障电流时电流波形
力熔断器 (如图 2.8-15 所示)，该系列产品符合 VDE0636、IEC 60269 以及 GB 13539 等低压熔断器标准，额定电压交流达到 690V，额定电流 4~1600A，额定分断能力达到 120kA。

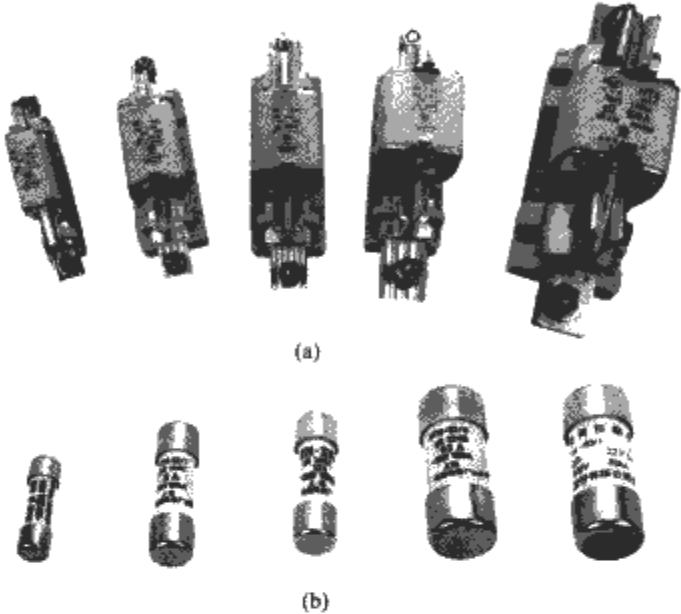


图 2.8-15 低压高分断能力熔断器
(a) NT 系列低压熔断器；
(b) RT14 系列低压熔断器

选用低压高分断能力熔断器作为电气设备故障保护主要考虑的因素：

(1) 额定工作电压。熔断器的额定工作电压应不小于电气设备额定工作电压。如熔断器工作电压选择过高，在分断故障时，产生的过电压会相对较高，因此，尽可能接近为最合适。

(2) 额定工作电流。熔断器的额定工作电流要根据被保护的电气设备额定电流、工作状态、使用环境等因素进行综合考虑。

保护对象为电动机时，首先考虑起动状态，是否配有软起动或变频装置改变起动特性，其次考虑电动机起动电流值及起动时间，然后从熔断器的电流时间特性中选出能够使电动机既能正常起动又能可靠分断故障电流相应的熔断器额定工作电流值。一套简单的电动机线路，通常由熔断器—接触器—热继电器—电动机组成。根据经验，在此线路中，熔断器额定电流约为 1.2~1.5 倍电动机额定电流。对于起动条件比较苛刻的场合，熔断器额定电流应选用较大一些的倍数。

保护对象为电缆时，应对电缆使用环境状态、绝缘材料的耐热强度以及载流能力等因素进行综合考虑。通常按如下公式可以计算

$$I_{\text{max}} \leq 1.45 I_z$$

式中： I_{max} 为电缆的可靠工作状态允许流过的最大过载电流值； I_z 为电缆载流能力。

该式的含义为：选用的熔断器最小熔化电流要不大于 $I_{\text{max}}/1.45$ 。

(3) I^2t 值 (焦耳积分)。 I^2t 值反映熔断器在分断故障

电流状态时所产生的热容量。因此，熔断器的 I^2t 值应该小于被保护的电气设备的 I^2t 值。

(4) 额定分断能力。熔断器的额定分断能力应不小于电气回路中出现的最大短路电流值。

(5) 熔断器的级间配合。对保护电缆、导线的熔断器而言，要满足前后级熔断器在任何故障电流出现时，均能选择性、可靠分断故障电流，前后级熔断器之间的时间电流特性应相互配合。

在过载和短路电流较小的情况下，可按上下级熔断器额定电流值之比为 1 : 1.6（额定电流 16A 以下不适用）。在短路电流非常大的情况下，由于超快速熔化，熔断器的时间电流特性有重叠，对于这种情况，必须根据熔断器熔化 I^2t 值和熔断 I^2t 值进行选择。在达到下列条件时可有最佳配合：

- 1) 负载熔断器熔断 I^2t 值比后备熔断器熔化 I^2t 值小，即负载熔断器必定熔断。
- 2) 后备熔断器熔化 I^2t 值选择要大于负载熔断器熔断 I^2t 值，后备熔断器不得熔断。

综合上述几方面的选用要求，低压高分断能力熔断器就能在故障状态下起到可靠保护电气装置的作用。

5.2 半导体设备保护用熔断器

目前，国内企业生产的半导体设备保护用熔断器的型号主要有上海电器陶瓷厂有限公司生产的 NGT 系列和 RST 系列半导体器件保护用熔断器，如图 2.8-16 所示，产品符合 VDE0636、IEC 60269 以及 GB 13539 等低压熔断器标准，额定电压交流达到 1500V，额定电流 25~3600A，额定分断能力达到 100kA。

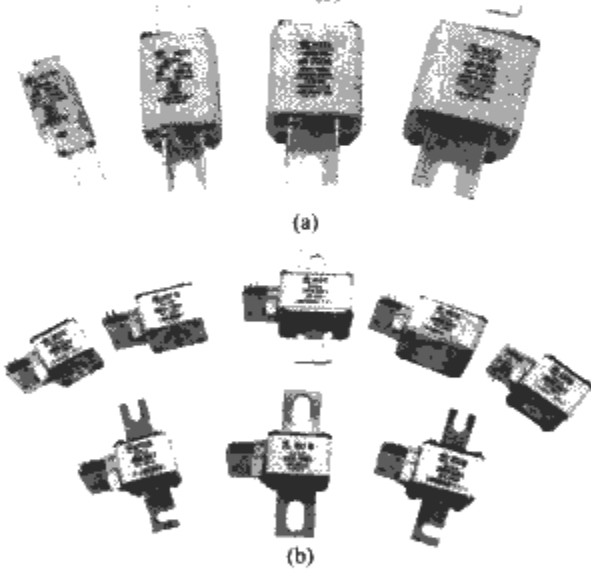


图 2.8-16 半导体设备保护用熔断器
(a) NGT 系列低压熔断器；
(b) RST10 系列低压熔断器

选用半导体设备保护用熔断器作为电气设备故障保护，其选用时所要考虑的因素比一般低压高分断能力熔断器更为复杂，主要考虑的参数如下：

(1) 额定工作电压。熔断器的额定工作电压不小于半导体器件额定工作电压，如熔断器工作电压选择过高，在分断故障电流时，产生的过电压相对较高，有可能造成其他相半导体器件被击穿。因此，尽可能接近为最合适，必须使熔断器断开过电压不大于半导体器件允许的反向峰值电压。

(2) 额定工作电流。熔断器的额定工作电流要根据被保护的电气设备额定电流、工作状态、使用环境等因素进行综合考虑。如图 2.8-17 所示为比较典型的三相整流系统原理图。

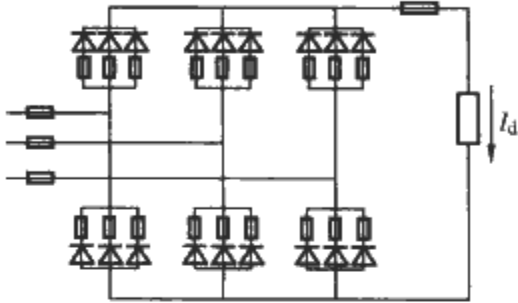


图 2.8-17 单路及三相的整流系统原理图

表 2.8-7 单路及三相的整流系统分路、支路电流有效值

线路	分路电流有效值		支路电流有效值	
	电阻负载	电感负载	电阻负载	电感负载
单路	$1.57I_d$	$1.42I_d$		
三相	$0.58I_d$	$0.58I_d$	$0.82I_d$	$0.82I_d$

熔断器额定工作电流是由安装点的电流有效值来决定的，安装点的电流有效值根据变流装置不同线路而定，如表 2.8-7 所列。如果熔断器电流等级不能满足线路要求，可以将两个相同规格熔断器并联使用，并联使用时熔断器电流不均匀分布差异约为±5%。

(3) I^2t 值（焦耳积分）。 I^2t 值是反映熔断器在分断故障电流状态时所产生的热容量。判断熔断器是否能够起有效保护作用， I^2t 值就显得非常重要。为了便于比较，可以将半导体设备在 10ms 时的 I^2t 值作为参考点，必须满足：熔断器的全部 I^2t 值必须不大于被保护半导体设备的 I^2t 值。

(4) 分断过电压。熔断器在分断故障电流过程中产生的过电压，它使半导体设备受到反向峰值电压，可能引起半导体设备的损坏。由于半导体设备对电压的敏感性给半导体设备保护用熔断器提出比较高的要求。一般熔断器的分断过电压不大于 2.3 倍额定工作电压值。

(5) 允通电流。允通电流也是一个很重要的参数，用 I^2t 值判断熔断器是否能够起到有效保护作用。反映熔断器在分断故障电流状态时的允通电流不大于被保护半导体设备允通电流，熔断器就能起到可靠的保护作用。

(6) 额定分断能力。熔断器的额定分断能力不小于半导体设备中出现的最大短路电流值。

综合上述几方面的选用要求，半导体设备保护用熔断器就能在故障状态下起到可靠保护电气装置的作用。

第9章 剩余电流动作保护电器

1 剩余电流动作保护电器及其工作原理

剩余电流动作保护电器 (Residual current operated protective devices) (简称剩余电流保护电器, 又称为漏电电流保护电器) 是一种安全保护电器, 被广泛地使用在低压电网中, 用来防止人身触电、电气火灾及因接地故障引起的人身伤害及电气设备损坏事故。

1.1 剩余电流动作保护电器概况

剩余电流动作保护电器是电流动作型漏电保护电器, 通过检测电路中的接地故障电流来进行保护。早期的漏电保护装置是通过检测电路中的接地故障电压来进行保护的, 称为电压动作型漏电保护装置。

电压动作型漏电保护装置是检测设备金属外壳与大地之间的故障电压, 当故障电压达到预定的危险极限值时, 电压线圈推动锁扣机构使主开关触头断开, 切除故障电压进行保护。根据其工作原理, 电压动作型漏电保护装置只能控制单台用电设备, 遇到感应雷击时, 电压线圈易烧毁, 不能作为直接接触保护和实行分级保护。

由于电压动作型漏电保护装置固有的缺点, 逐渐被电流动作型保护装置取代。电流动作型漏电保护装置采用电流互感器检测故障电流, 当互感器的一次回路产生一个故障电流时, 二次回路即产生一个感应电压, 当感应电压达到一定值时, 使装置动作。电流动作型漏电保护装置动作较为可靠, 并可作为直接接触的补充保护, 也可实行分级保护。因此, 目前世界各国使用的漏电保护装置基本上都是电流动作型漏电保护装置, 即本章所述的剩余电流动作保护电器。

剩余电流动作保护电器在我国起步较晚, 早期称为漏电保护器或触电保护器等。20 世纪 60 年代后期首先在农电系统推广使用, 主要是电压动作型的漏电保护装置。70 年代中期, 才由当时的第一机械工业部组织专业化生产剩余电流动作保护电器。1986 年国家标准局批准发布了我国第一个剩余电流动作保护电器的国家标准 GB 6829—1986《漏电电流动作保护器 (剩余电流动作保护器)》。80 年代后期和 90 年代初期国家有关部门制定了一系列剩余电流动作保护电器的安装规程, 促进了剩余电流动作保护电器推广使用。

经过多年推广普及, 我国的低压电网基本上普及了剩余电流动作保护电器的使用, 至 2005 年全国剩余电流动作保护电器的年产量已超过 3000 万台, 在安全用电中发挥了巨大的作用。

1.2 工作原理

剩余电流动作保护电器是指能同时完成检测剩余电流, 将剩余电流与基准值相比较, 以及当剩余电流超过基准值时, 断开被保护电器、输出机械触点开闭信号或发出报警信号的装置。

剩余电流动作保护电器的工作原理如图 2.9-1 所示。剩余电流动作保护电器一般应包括检测元件 (剩余电流互感器)、判别元件 (剩余电流脱扣器)、执行元件 (机械开关电

器或报警装置)、试验装置和电子信号放大器 (仅电子式剩余电流动作保护电器有) 等部分。

检测元件用来检测线路中的剩余电流, 判别元件把检测到的剩余电流与预定值相比较, 当剩余电流达到或超过预定值时, 发出一个脱扣信号, 使执行元件断开电路或驱动报警装置发出报警信号。

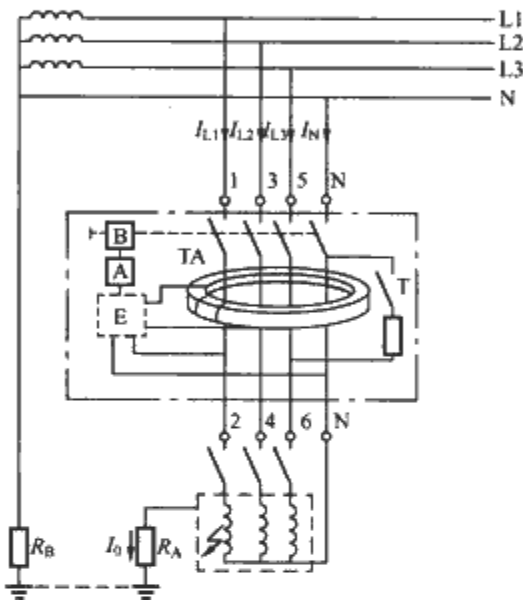


图 2.9-1 剩余电流动作保护电器的工作原理图
A—判别元件; B—执行元件; E—电子信号放大器;
RA—工作接地的接地电阻; RB—电源接地的接地电阻;
T—试验装置; TA—检测元件

1.2.1 剩余电流动作保护电器的工作原理

剩余电流是通过剩余电流动作保护电器主回路的电流瞬时值矢量和的有效值, 一般采用剩余电流互感器来检测电路中的剩余电流。主回路的带电导体穿过剩余电流互感器, 构成互感器的一次回路导体, 二次路线圈的导体缠绕在互感器的铁心上。

在正常情况下, 剩余电流动作保护电器所控制的电路中没有发生触电、漏电或接地故障时, 通过电流互感器一次回路的电流矢量和等于零, 即

$$\dot{I}_{L1} + \dot{I}_{L2} + \dot{I}_{L3} + \dot{I}_N = 0 \tag{2.9-1}$$

则电流 \dot{I}_{L1} 、 \dot{I}_{L2} 、 \dot{I}_{L3} 和 \dot{I}_N 在电流互感器铁心中产生的磁通的矢量和也为零, 即

$$\dot{\Phi}_{L1} + \dot{\Phi}_{L2} + \dot{\Phi}_{L3} + \dot{\Phi}_N = 0 \tag{2.9-2}$$

这样在电流互感器的二次线圈中没有感应电压输出, 因此剩余电流动作保护电器保持正常供电。

当电路中发生设备漏电、有人触电等接地故障时, 通过设备接地电阻 R_A 有一个接地电流 I_0 流过, 则通过互感器电流的矢量和不等于零, 为

$$\dot{I}_{L1} + \dot{I}_{L2} + \dot{I}_{L3} + \dot{I}_N = \dot{I}_0 \tag{2.9-3}$$

剩余电流互感器铁心中产生的磁通矢量和也不等于零, 即

$$\dot{\Phi}_{L1} + \dot{\Phi}_{L2} + \dot{\Phi}_{L3} + \dot{\Phi}_N = \dot{\Phi}_0 \tag{2.9-4}$$

这样互感器二次回路就有一个感应电压输出，此电压直接或通过一个电子信号放大器施加在剩余电流脱扣器的脱扣线圈上产生一个工作电流。二次回路的感应电压输出随着故障电流的增大而增大，当接地故障电流达到额定值时，脱扣线圈中的电流足以推动脱扣机构动作，使主开关断开电路或使报警装置发出报警信号。

剩余电流互感器二次回路输出信号的功率比较小，一般小于 1 mVA。要直接推动剩余电流脱扣器动作，需要脱扣器具有很高的动作灵敏度，要求其动作功耗在微伏安级。这种剩余电流脱扣器一般采用释放式脱扣器，结构复杂、工艺要求较高。互感器二次回路的输出信号也可以通过一个电子放大器放大后施加到脱扣器上，这种情况下对脱扣器的灵敏度要求较低，可以采用拍合式的电磁铁或螺管电磁铁，结构简单、工艺要求较低。前者在执行剩余电流保护功能时不需要工作电源，称为动作功能与电源电压无关的剩余电流动作保护电器（也称电磁式剩余电流动作保护电器），后者称为动作功能与电源电压有关的剩余电流动作保护电器（也称电子式剩余电流动作保护电器），电磁式与电子式剩余电流动作保护电器的原理图如图 2.9-2 所示。

1.2.2 电子式和电磁式剩余电流动作保护电器的比较

电磁式剩余电流动作保护电器的检测装置，其二次回路的感应电压没有经过放大，直接推动脱扣器动作，因而不需要辅助电源。而电子式剩余电流动作保护电器，感应电压经过电子放大线路放大，然后推动脱扣器动作，因而电子式需

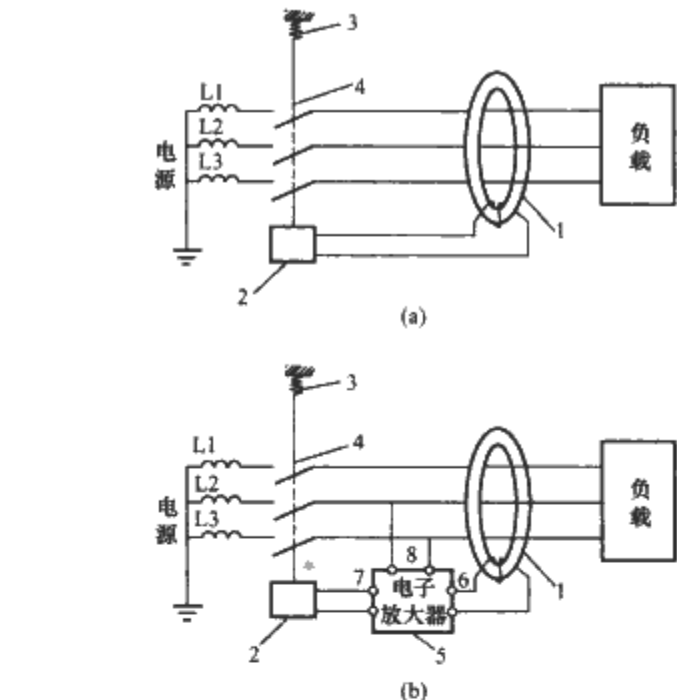


图 2.9-2 电磁式与电子式剩余电流动作保护电器的原理图
(a) 电磁式；(b) 电子式

1—检测装置；2—脱扣器；3—分断弹簧；4—主开关；
5—电子放大器；6—电子放大器输入；7—电子放大器输出；8—电子放大器电源输入

要对电子放大线路及脱扣器供电才能正常工作。由于工作原理不一样，所以两者在工作可靠性、受环境的影响程度及制造成本等方面有较大差别。电磁式和电子式剩余电流动作保护电器特点的比较见表 2.9-1。

表 2.9-1 电磁式和电子式剩余电流动作保护电器特点比较

项 目	电磁式剩余电流动作保护电器	电子式剩余电流动作保护电器
辅助电源	不需要	需要
电压波动对特性影响	无	有（采取稳压措施可减少影响）
电压故障时工作状态	不受影响	电源故障时不能动作（电压跌落或电源线断开）
温度对特性的影响	很小	有（有温度补偿措施可减少影响）
绝缘耐压能力	强	弱
耐过电压能力	强	弱（有过电压保护器可提高耐过电压能力）
外界电磁场的影响	抗电磁干扰性能好	抗电磁干扰性能差（电子电路中采用抗干扰措施可减少影响）
结构	较复杂	简单
工艺要求	高	低
接线要求	进出线可反接	进出线不能反接（电子回路有断开装置可反接）
电流等级	大额定电流等级制造困难，一般在 125A 以下	大额定电流等级制造方便。配电装置用的剩余电流动作保护电器额定电流较大，一般均为电子式
剩余动作电流	剩余动作电流一般大于等于 10mA	可以制成高灵敏度，例如剩余动作电流为 6mA
制造成本	较高	较低
派生功能	只能制成快速动作型或 S 型	可派生延时型、预报警、故障报警、显示等多种功能
耐冲击振动性能	受到一定的限制	较好
安装规程	不受限制	欧洲及澳洲有些国家限制非专业人员使用电子式剩余电流动作保护电器

对电磁式和电子式剩余电流动作保护电器的使用，各国或地区有不同的要求。

在 IEC 标准和我国国家标准中规定电子式和电磁式剩余电流动作保护电器都可使用。随着电子技术的发展，对电子放大装置采取了相应的技术措施和电磁兼容设计，电子式剩余电流动作保护电器的可靠性和抗干扰性能有了很大提高，在北美、日本等国家主要使用电子式剩余电流动作保护电器。我国电子式和电磁式都有应用，其中电子式较多，约占 80% 以上，近几年来电磁式应用数量有所增加。

在 VDE 标准及其他一些欧洲国家的产品标准和安装规

程中，限制了非专业人员使用的剩余电流动作保护电器采用电子式的结构，所以在欧洲的家用电流动作保护电器基本上都是电磁式结构。

1.2.3 带接地故障保护断路器的检测原理

随着电子技术的发展，采用电子脱扣器的断路器（下面称为电子式断路器）已逐渐普及。电子式断路器一般均可派生为带接地故障保护的断路器。带接地故障保护的断路器能检测电路中的接地故障电流，当接地故障电流大于预定值时能断开被保护电路，切断接地故障。

本节所指的带接地故障保护的断路器实际上也是一种剩

余电流动作保护电器，接地故障电流在理论上也是剩余电流，即也是通过主回路的电流瞬时值的矢量和。因为接地故障电流在检测方式及电流数值上与 1.2.1 所述的剩余电流动作保护电器的剩余电流的检测方式及电流值不一样，因此习惯上将前者称为接地故障电流，后者称为剩余电流。1.2.1 所述的剩余电流动作保护电器的剩余动作电流一般小于等于 30A，本节所述的带接地故障保护断路器的接地故障动作电流一般大于 30A。

电子式断路器不是采用剩余电流互感器检测，而是直接采用电流互感器检测每相的电流信号，然后通过微处理器矢量运算，计算电路中的接地故障电流。图 2.9-3 所示为电子式断路器的原理框图，TA1、TA2 和 TA3 是每相的电流信号检测互感器，TA1、TA2 和 TA3 检测的电流信号经整流和放大后送入微处理器保护控制单元进行矢量运算，如计算结果存在接地故障电流并且等于或大于动作设定值，则通过脱扣执行元件使断路器脱扣。

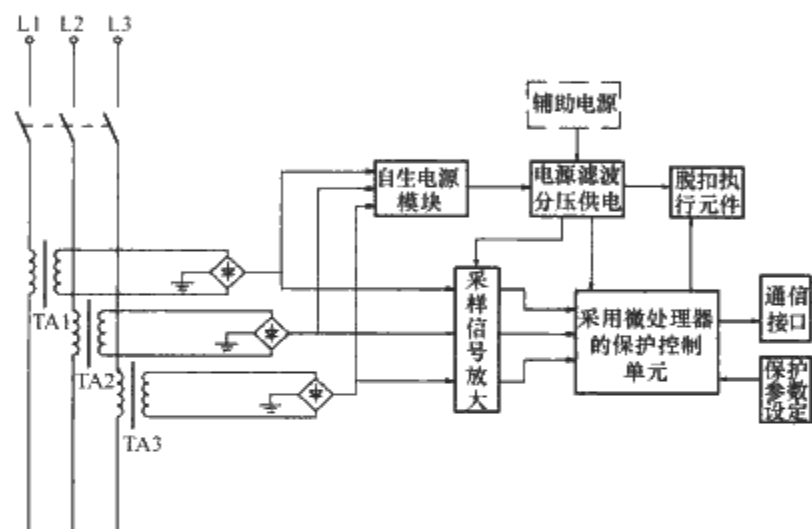


图 2.9-3 电子式断路器原理框图

电子式断路器的电流互感器主要用来检测主电路的过载电流和短路电流，检测电流的范围从几十安培至几万安培，其铁心材料通常采用带气隙的硅钢片，以增加测量范围的线性度，或采用空心互感器来测量（例如万能式断路器的电流检测互感器）。因此相比剩余电流互感器，断路器的电流互感器的检测灵敏度较低。此外，由于制造工艺和材料的限制，各相电流互感器不可能完全对称，并有一定的测量误差，导致互感器的测量信号在微处理器中合成矢量有较大的误差，根据断路器额定电流的大小，该误差可达几安培至几十安培，因此检测灵敏度要求较高的剩余电流动作保护电器不能采用这种方式检测。电子式断路器的接地故障动作电流的整定值为断路器额定电流的 20%~100%，约为几十安培至几千安培，对上述的误差可忽略不计。

由于直接采用各相的电流互感器检测并由微处理器计算接地故障电流，电子式断路器几乎不需增加任何硬件即可派生成带接地故障保护的断路器，大大降低了成本，因此新一代电子式断路器一般均具有接地保护功能。

2 剩余电流动作保护电器主要部件及其结构

剩余电流动作保护电器主要由剩余电流互感器、剩余电流脱扣器、信号放大装置和执行元件等部分组成，其主要元器件的结构如下所述。

2.1 剩余电流互感器

2.1.1 剩余电流互感器的矢量图

剩余电流互感器的主要功能是检测通过互感器铁心的主电路的剩余电流（触电、漏电等接地故障电流），并将一次

回路的剩余电流转换成二次回路的输出电压。二次回路输出电压直接或通过信号放大装置将信号放大以后施加到剩余电流脱扣器的脱扣线圈上，使脱扣器动作。剩余电流互感器工作性能的优劣将直接影响剩余电流动作保护电器的性能和工作可靠性。剩余电流互感器一次回路和二次回路的电流与电压关系的矢量图如图 2.9-4 所示。

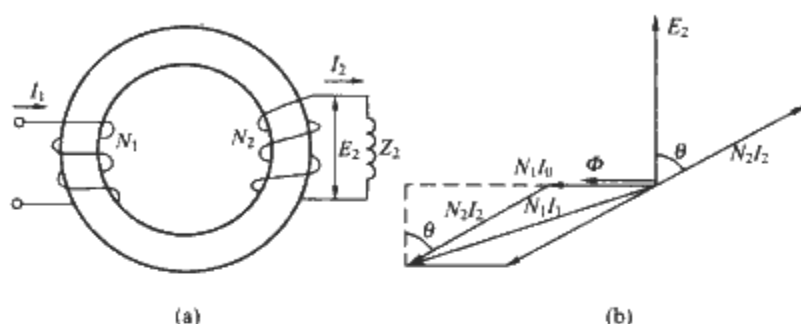


图 2.9-4 剩余电流互感器电流和电压关系的矢量图

(a) 示意图；(b) 矢量图

图 2.9-4 中 N_1 为互感器一次回路导线，对贯穿式环形互感器，即为穿过互感器主电路的导线； N_2 为二次回路导线，通常缠绕在环形铁心上，一次回路和二次回路通过铁心实现电磁耦合； I_1 为一次回路的电流； I_2 为二次回路的电流； I_0 为铁心的磁化电流， E_2 为二次回路的感应电压， θ 为二次回路的电流滞后角。根据矢量图，一次回路的电流、二次回路的电流及铁心的磁化电流之间的关系见式 (2.9-5) 和式 (2.9-6)

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 + N_1 I_0 \quad (2.9-5)$$

$$N_1 I_1 = \sqrt{(N_1 I_0 + N_2 I_2 \sin \theta)^2 + (N_2 I_2 \cos \theta)^2} \quad (2.9-6)$$

由式 (2.9-6) 可得出

$$I_1 = \frac{E_2}{N_1} \sqrt{\left(\frac{N_1^2}{Z_0 N_2} + \frac{N_2}{Z_2} \sin \theta\right)^2 + \left(\frac{N_2}{Z_2} \cos \theta\right)^2} \quad (2.9-7)$$

式中： E_2 为二次回路感应电压； Z_0 为励磁阻抗； Z_2 为二次回路阻抗。

由式 (2.9-7) 可以看出，在 N_1 、 N_2 等参数确定的条件下，相对于一次回路确定的电流值 I_1 ，要提高二次回路的感应电压 E_2 ，应尽可能提高互感器的励磁阻抗 Z_0 。

根据磁路定律，铁心的励磁阻抗

$$Z_0 = \frac{\omega N_1^2 \mu S}{l} \quad (2.9-8)$$

式中： μ 为铁心的磁导率； l 为铁心磁路的平均长度； S 为铁心截面积； ω 为电源角频率。

因此，要增大 Z_0 ，提高互感器的检测灵敏度，应提高互感器铁心的磁导率、铁心的截面积和一次回路的匝数，减小铁心的磁路长度。

2.1.2 提高互感器检测灵敏度和可靠性的措施

为提高剩余电流动作保护电器的动作灵敏度和工作可靠性，要求剩余电流互感器应具有高的检测灵敏度和检测可靠性。

(1) 提高检测灵敏度的措施。剩余电流互感器检测的电流范围一般从几个毫安至几百毫安，而互感器一次回路导线由于受到主电路导线截面积的限制往往只有一匝或几匝，励磁安匝较小。因此互感器是处在弱磁场的条件下工作，这就要求互感器的铁心具有较高的磁导率，尤其是要求有较高的初始磁导率。

剩余电流互感器的铁心一般采用高磁导率的铁镍软磁合金制成,例如1J85,其最大磁导率 μ_m 可大于0.628H/m,初始磁导率 μ_0 也可达0.0628H/m以上,特别适合于在弱磁场条件下工作,可以制成高灵敏度的剩余电流互感器。

近年来也有些产品采用高磁导率的非晶态或微晶态合金材料制造剩余电流互感器。非晶和微晶合金材料具有较高的磁导率,铁心加工及热处理的工艺要求较低,成本也相应较低,但其材料的稳定性相对铁镍软磁合金较差,一般用在对稳定性要求不是很高的剩余电流动作保护电器中。

对于剩余动作电流较大的其他剩余电流动作保护电器,例如剩余电流继电器等,也可以采用硅钢片、铁淦氧等其他高磁导率材料制造的互感器铁心。

由2.1.1可知剩余电流互感器的检测灵敏度还与互感器一次回路的匝数 N_1 、铁心的截面 S 和磁路平均长度 l 有关,增加一次回路匝数、增大铁心截面尺寸和减少磁路平均长度都能提高检测灵敏度。但一次回路匝数受到主回路温升及结构的限制不能过多,即使额定电流较小的剩余电流动作保护电器一般也不会大于5~6匝。额定电流较大的剩余电流动作保护电器,一次回路只能采用穿心式,不可能增加匝数。而增大铁心截面尺寸和减少磁路长度又受到几何尺寸的限制,根据剩余电流动作保护电器的结构没有很大的变动余地,需综合进行考虑。

(2) 提高检测可靠性的措施。电路在正常情况下总存在一定的泄漏电流,剩余电流动作保护电器在正常泄漏电流时不能误动作,而超过设定值时必须正确动作,因此要求剩余电流互感器有高的检测可靠性。这与互感器铁心的材料、结构及加工工艺有很大关系。

从理论上讲,当没有接地故障时,通过互感器一次回路的每相电流在铁心中产生的磁通应相互抵消,剩余电流互感器的二次回路应该没有输出,即如式(2.9-2)所示。

实际上,由于漏磁通的存在、一次回路导线布置不对称和互感器铁心周边方向磁导率的不均匀,即使主电路没有接地故障时,一次回路电流产生的磁通也不会完全抵消,二次回路就有一个微弱残留信号输出。随着主回路工作电流的增大,不平衡的程度也会增大,尤其是电动机或用电设备启动时产生的大启动电流作用下,残留输出信号也会增大,甚至导致剩余电流动作保护电器误动作。为此,要尽量减少残留输出信号,因此要求剩余电流互感器的一次回路导线尽量对称布置,磁回路的截面和磁导率均匀对称,以减少漏磁通的影响。互感器铁心形状一般为圆环形,采用带材卷绕或用板材冲成环形薄片重叠而成,并采用适当的屏蔽层对互感器的铁心进行屏蔽,以减少漏磁通的影响。对于大电流等级的剩余电流动作保护电器,因为额定电流较大,启动电流可达到几千安培,漏磁通的影响更为明显,必须采用更为完善的屏蔽措施,才能达到平衡特性的要求。

此外,还要考虑温度变化和短路电流流过时对互感器特性的影响。因此要求铁心材料的磁导率具有较高的温度稳定性,防止温度变化引起动作特性的变化。同时要求制造铁心的材料具有较小的矫顽力 H_c ,减少剩磁的影响,防止大电流冲击后引起动作电流的变化。铁镍软磁合金制造的互感器较非晶合金和微晶具有更高温度稳定性和磁性稳定性,在温度变化时和短路电流冲击后,动作电流不会发生明显的变化。

2.1.3 剩余电流互感器的结构

如图2.9-5所示为SA系列剩余电流断路器互感器的典型结构,主要由铁心、绝缘罩壳、二次回路线圈、试验回路

线圈、绝缘片、屏蔽片、屏蔽圈、二次回路和试验回路线圈引出线和绝缘外壳等组成。整个互感器铁心,包括二次回路线圈、试验回路线圈和屏蔽等用环氧树脂封装在一个绝缘外壳中,二次回路线圈和试验回路线圈通过引出线引出。

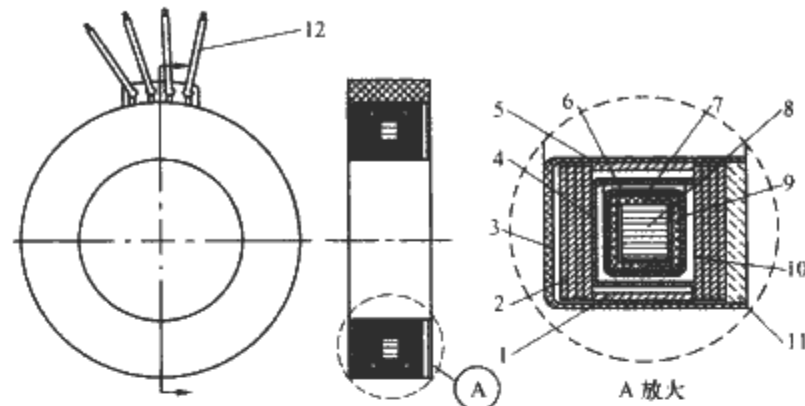


图 2.9-5 SA 系列剩余电流断路器互感器的典型结构
1—屏蔽圈；2—屏蔽片；3—绝缘外壳；4—罩壳；5—屏蔽圈；
6—线圈；7—罩壳；8—铁心；9—罩壳；10—绝缘片；
11—环氧树脂；12—二次回路和试验回路引出线

剩余电流断路器的主电路导体(一次回路)通过互感器的贯穿孔,图2.9-6所示为SL系列800A四极剩余电流断路器主电路导体的布置图。主电路采用导电棒或导电排制成,相导体和中性线导体均通过互感器的贯穿孔。主电路导体在贯穿孔中对称排列,相互之间用绝缘隔板隔开,以提高互感器的平衡特性。

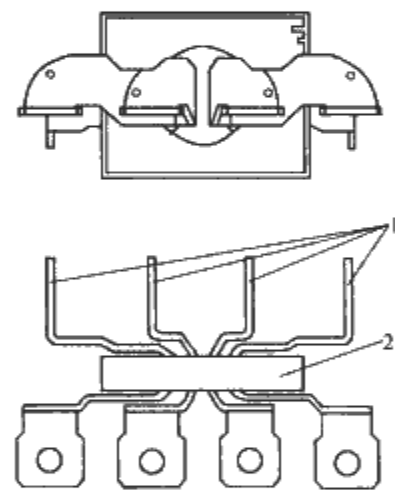


图2.9-6 SL 系列 800A 四极剩余电流
断路器主电路导体的布置
1—一次回路导体；2—剩余电流互感器

2.2 剩余电流脱扣器

剩余电流动作保护电器的脱扣器是一个判别元件,用它来判别剩余电流是否达到预定值,从而确定剩余电流装置是否应该动作。动作功能与电源电压无关的剩余电流动作保护电器采用灵敏度较高的释放式脱扣器,动作功能与电源电压有关的剩余电流动作保护电器采用拍合式电磁铁或螺管电磁铁。

2.2.1 释放式脱扣器

释放式脱扣器的典型结构如图2.9-7所示,图2.9-7(a)为直动式打击杆结构,图2.9-7(b)为转动式打击杆结构,目前采用直动式的结构形式较多。释放式脱扣器一般由磁轭、衔铁、永久磁钢、释放弹簧、消磁线圈、打击杆、外壳等部件组成。电路正常时衔铁吸合在磁轭上,当消磁线圈中的电流产生的磁通足以抵消永久磁钢磁通时,衔铁在弹簧的作用下释放,通过打击杆输出一个机械脱扣力。

释放式脱扣器的工作原理如图2.9-8所示,图中 I_2 为消磁线圈中流过的交流电流, Φ_1 为衔铁上的直流磁通, Φ_2 为短路磁铁的直流磁通, Φ_3 为衔铁上的交流磁通; W 为消

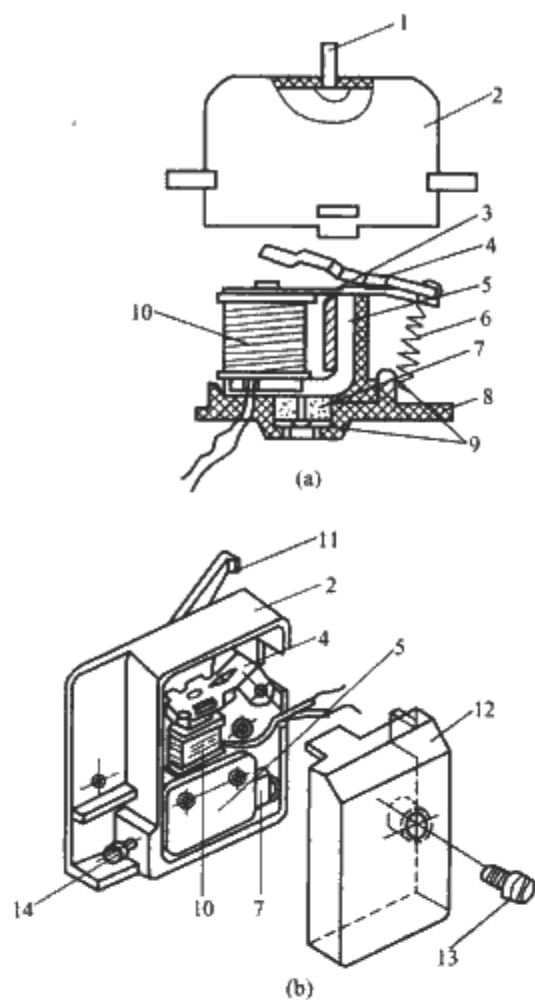


图 2.9-7 释放式脱扣器的典型结构
(a) 直动式打击杆结构；(b) 转动式打击杆结构
1—直动式打击杆；2—外壳；3—弹簧；4—衔铁；
5—磁轭；6—释放弹簧；7—磁钢；8—底座；9—弹
簧垫圈；10—消磁线圈；11—打击杆；12—罩壳；
13—紧固螺钉；14—调节螺钉

磁线圈的匝数， R_g 为衔铁与磁轭吸合面的磁阻， R_s 为非磁性垫片间隙的磁阻， R_m 为永久磁钢的磁阻， Φ_m 为永久磁钢产生的总直流磁通， U_0 为永久磁钢的磁势， R_1 为磁轭上半部分的磁阻， R_2 为短路磁铁磁阻， R_3 为磁轭下半部分的磁阻， R_4 为衔铁的磁阻。短路磁铁主要有两个功能：一是为交流磁通 Φ_2 提供一个低磁阻的通路；二是当衔铁打开时为磁钢提供一个低磁阻的通路，可加速衔铁打开，并防止因磁路开路对磁钢产生的退磁作用。

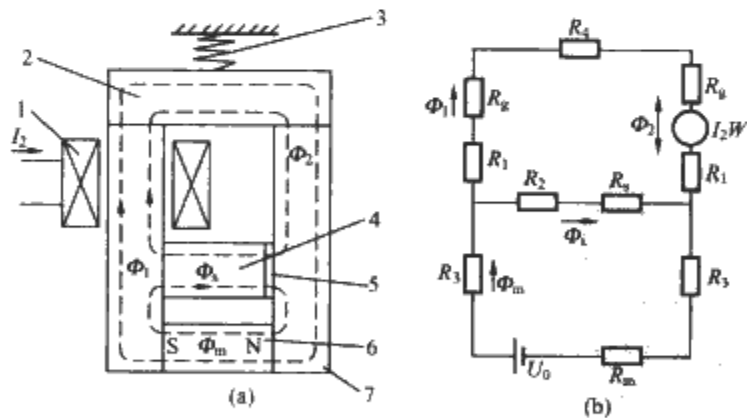


图 2.9-8 释放式脱扣器的工作原理图
(a) 结构图；(b) 等效电路图

1—消磁线圈；2—衔铁；3—反作用弹簧；4—短路磁铁；
5—非磁性垫片；6—永久磁钢；7—磁轭

在正常情况下，衔铁在磁钢产生的直流磁通 Φ_1 的作用下，克服弹簧的反作用力保持在吸合位置。当剩余电流动作保护电器所控制的电路存在接地故障时，剩余电流互感器的二次回路有一个电压输出，在脱扣器的消磁线圈中就有一个电流 I_2 流过，在磁轭、短路磁铁和衔铁构成的磁回路中产

生一个交流磁通 Φ_2 ，该交流磁通有半个周期与直流磁通 Φ_1 方向相反，抵消了部分衔铁吸合面的吸力。当 I_2 足够大时，衔铁在反作用力弹簧的作用下被释放，打击断路器的脱扣机构，使断路器跳闸。正常工作时，衔铁处于闭合状态，交流消磁磁通的磁回路基本上处于闭合状态，磁阻很小，只需要很小的励磁功率就能使衔铁释放，所以释放式脱扣器能达到较高的动作灵敏度。

释放式脱扣器一般采用高磁导铁镍合金材料制成，例如 1J50 铁镍软磁合金。衔铁和磁轭极面经过高精度精密研磨，保证极面光洁平整，使工作极面的磁阻尽可能小，以提高脱扣器的灵敏度。为了保证脱扣器工作的可靠性和稳定性，应防止灰尘、水汽、油污，尤其是磁性粒子等对工作气隙的影响。工作极面还要进行机械老化工序处理，确保极面吸合的稳定性。在整个装配过程中必须保持零部件的清洁，并经过净化清洗后密封安装在一个塑料或金属的外壳中。

2.2.2 拍合式电磁铁和螺管式电磁铁脱扣器

拍合式电磁铁和螺管式电磁铁脱扣器的典型结构如图 2.9-9 所示，其中图 2.9-9 (a) 所示为拍合式电磁铁，图 2.9-9 (b) 所示为螺管式电磁铁。在正常工作时，衔铁处于打开位置。当线圈中通以励磁电流 I 并达到规定的数值时，衔铁被吸合，同时带动与衔铁相连的打击杆，使断路器脱扣跳闸。在正常工作时，衔铁处于开启位置，磁回路的磁阻比较大，因此需要较大的励磁电流才能使衔铁吸合。脱扣器的动作灵敏度较低，动作电流一般在几百毫安至几千毫安。互感器二次回路的输出信号必须经过放大以后才能推动这种型式的脱扣器动作。但是，这种型式的脱扣器结构比较简单，制造工艺要求不高，制造成本相对较低，一般适用于动作功能与电源电压有关的剩余电流动作保护电器。

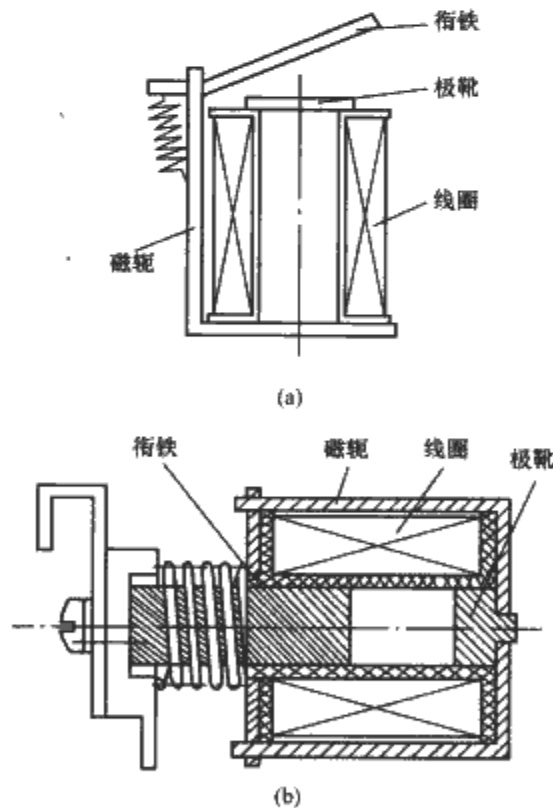


图 2.9-9 拍合式和螺管式电磁铁结构
(a) 拍合式电磁铁；(b) 螺管式电磁铁

2.3 电子信号放大装置

剩余电流互感器二次回路的输出功率很小，一般仅达到微伏安的等级。在剩余电流互感器和脱扣器之间增加一个信号放大装置，不仅可以降低对脱扣器的灵敏度要求，而且可以减少对剩余电流互感器输出信号的要求，减轻互感器的负担，从而可以缩小互感器的质量和体积，降低剩余电流动作

保护电器的成本。信号放大装置一般采用电子式放大器，有以下几种形式。

2.3.1 采用分立元件的电子放大装置

如图 2.9-10 所示为采用分立元件电子放大装置的线路，TA 是剩余电流互感器，L 是剩余电流脱扣器的脱扣线圈，VD1~VD4 组成的桥式整流电路对晶闸管 VTH 和脱扣线圈组成的电路供电。互感器二次回路输出信号经过 VD5 整流以后触发 VTH 的触发极，晶闸管导通，接通 L 的供电回路，使剩余电流脱扣器动作。

分立元件的电子放大器结构简单、成本较低，但二次回路输出直接触发触发极，调整动作电流比较困难，动作电流分散性也大。此外，电路中缺乏必要的抑制电磁干扰的措施，因此可靠性及抗干扰能力均较差，误动作也较多，目前仅在

一些廉价的家用电流断路器中还有应用。

2.3.2 采用专用集成电路的电子放大装置

剩余电流动作保护电器的专用集成电路是专门为剩余电流动作保护电器的特殊要求而设计的电路，使电路能以最少的外接元件完成剩余电流动作保护电器信号放大和处理的要求。专用集成电路在单片芯片上集成了稳压回路、基准电源、干扰抑制、差分放大、电平判别、整形驱动等多种功能单元，具有功耗小（静态功耗约为 5 mW，动态功耗约为 200 mW）、工作电压范围大、抗干扰能力强等优点。目前国内常用的专用集成电路有上海复旦微电子公司的 VG54123，FM2140、FM2145，无锡华润矽科微电子公司的 CS54123，日本三菱电气公司的 M54123、M54133，美国 Fairchild 半导体公司的 RV4141、RV4141A 等。

如图 2.9-11 所示为采用 VG54123 (M54123) 集成电路的放大装置的电气原理图。互感器二次回路的输出电压输入到集成电路的输入端（端口 1 和 2），当输入电压达到集成电路的动作门电压（约为 10mV 左右）时，集成电路的输出端（端口 7）电位立即变成高电位，使晶闸管 VTH 导通，电容器 C₈ 通过 VTH 对脱扣线圈 KL 放电，从而使脱扣器动作。通过改变输入端口 1 和 2 的并联电阻 R₁，可以改变剩余电流动作保护电器的剩余电流动作值。VG54123 的动作时间没有延时，集成电路的响应时间小于 6ms，一般用于快速动作的剩余电流动作保护电器。集成电路输入端的二极管 VD1 和 VD2 是钳位二极管，防止瞬态过电压的影响。电容 C₁、C₂ 和电阻 R₂ 组成高频滤波电路，防止高频干扰。

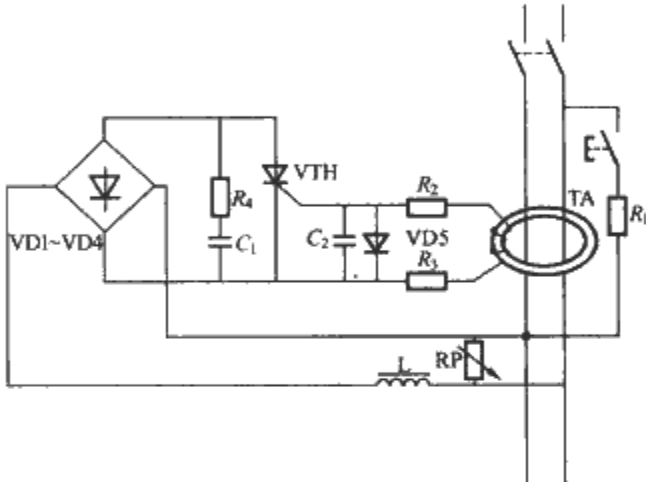


图 2.9-10 采用分立元件电子放大装置的线路

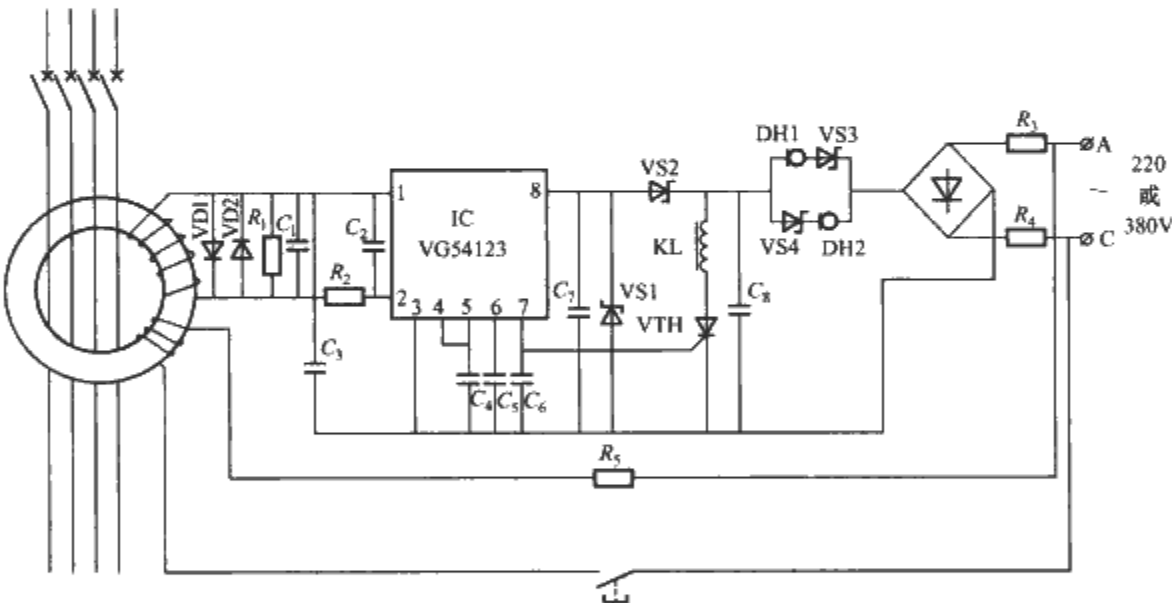


图 2.9-11 采用 VG54123 (M54123) 集成电路的放大装置的电气原理图

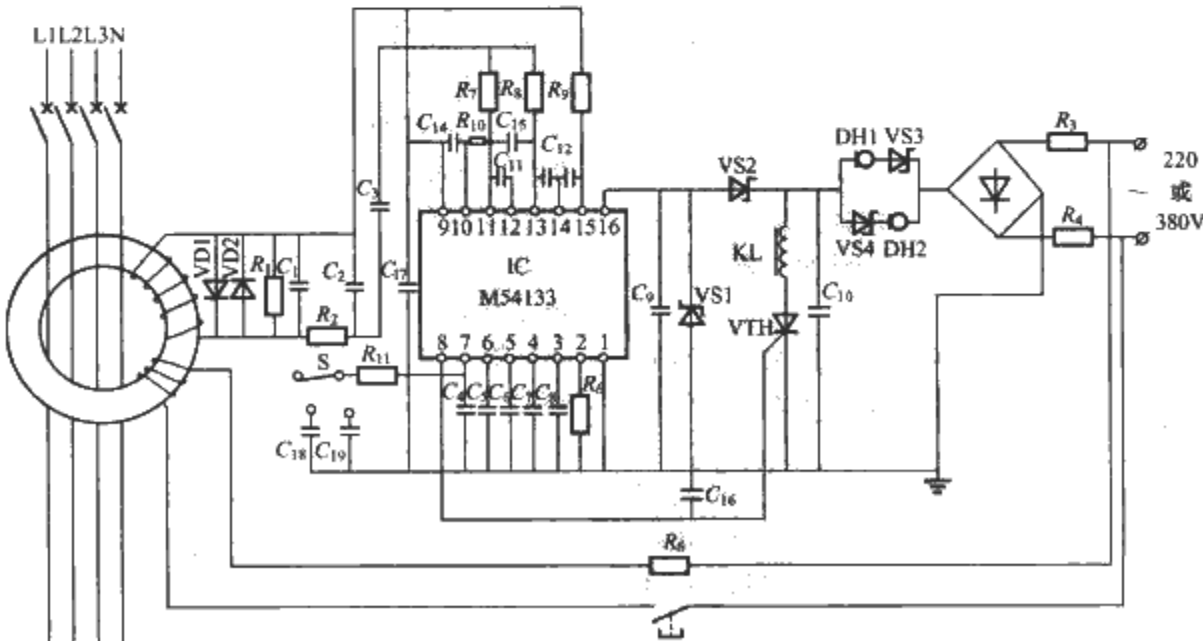


图 2.9-12 采用 M54133 集成电路的放大装置的电气原理图

如图 2.9-12 所示为采用 M54133 集成电路的放大装置的电气原理图。互感器二次回路的输出电压输入到集成电路的输入端（端口 13 和 15），当输入电压达到集成电路的动作门电压（约为 15 mV 左右）时，集成电路的输出端（端口 8）电位立即变成高电位，使晶闸管 VTH 导通，电容器 C_{10} 通过 VTH 对脱扣线圈 KL 放电，从而使脱扣器动作。通过改变输入端口 13 和 15 的并联电阻 R_1 ，可以改变剩余电流动作保护电器的剩余电流动作值。M54133 内置延时调节功能，可以通过端口 7 的外部电容调节延时时间，即通过开关 S 可选择端口 7 的并联电容 C_{18} 或 C_{19} ，调节延时动作时间。

2.3.3 采用微处理器的信号处理放大装置

随着微电子技术和计算机技术的发展，有的剩余电流动作保护电器开始采用微处理器控制器对信号进行放大、运算、处理和控制，不仅进一步提高了装置的保护性能和可靠性，扩展了剩余电流保护电器的功能，使剩余电流保护电器具有剩余电流测量、预报警、故障报警、显示及通信等多种功能，而且可以简化硬件结构。如图 2.9-13 所示为采用微处理器的信号处理装置的原理框图。

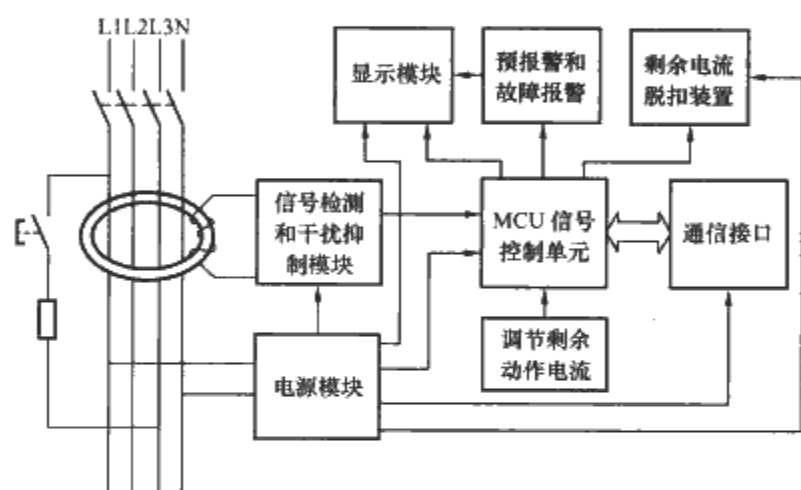


图 2.9-13 采用微处理器的信号处理装置的原理框图

2.4 执行元件

根据剩余电流动作保护电器所执行的功能不同，其执行元件也不同。对于剩余电流断路器，其执行元件是一个可开断主电路的机械开关电器；对于剩余电流继电器，其执行元件一般是一对或几对控制触头，输出机械开闭信号；对于剩余电流监视器，其执行元件是报警装置。

剩余电流断路器一般由断路器派生而成，执行元件即为断路器。断路器和剩余电流元件可位于同一壳体中，组成整体式的剩余电流断路器，也可以由剩余电流元件模块与断路器拼装，组成拼装式的剩余电流断路器。无论整体式或拼装式，机械结构上均是成为一体的。

剩余电流继电器与交流接触器或断路器通过电气连接可以组装成剩余电流断开装置。剩余电流继电器的输出触头执行元件控制接触器的控制线圈或断路器的分励脱扣器，控制主电路的接通和分断。

剩余电流继电器的输出触头执行元件也可控制可视报警或声音报警装置的电路，组装成剩余电流报警装置，当剩余电流超过整定值时发出报警信号。

由剩余电流继电器和机械开关装置或报警装置组成的剩余电流断开或报警装置，剩余电流继电器与相应的功能执行装置在结构上是分开的，相互之间通过电气连接组合在一起。

3 主要技术参数和特性及分类

3.1 剩余电流动作保护电器的主要技术参数和特性

按剩余电流动作保护电器相关标准，例如 GB 6829—1995《剩余电流动作保护器的一般要求》、GB 16916.1—2003《家用和类似用途的不带过电流保护的剩余电流动作断路器（RCCB） 第1部分：一般规则》、GB 16917.1—2003《家用和类似用途的带过电流保护的剩余电流动作断路器（RCBO） 第1部分：一般规则》、GB 14048.2—2001《低压开关设备和控制设备 低压断路器》、GB 19214—2003《电气附件 家用和类似用途剩余电流监视器》、GB 20044—2005《电气附件 家用和类似用途的不带过电流保护的移动式剩余电流装置（PRCD）》和 JB/T 8756—1998《剩余电流动作保护继电器》的规定，剩余电流动作保护电器的主要技术参数和特性应符合以下要求。

3.1.1 极数和电流回路数

单相两线剩余电流动作保护电器（中性线不可开断）；
二极剩余电流动作保护电器；
二极三线剩余电流动作保护电器（中性线不可开断）；
三极剩余电流动作保护电器；
三极四线剩余电流动作保护电器（中性线不可开断）；
四极剩余电流动作保护电器。

3.1.2 额定电流

(1) 额定电流 I_N 。额定电流是制造厂规定的剩余电流动作保护电器在规定的基准周围空气温度下，能在不间断工作制下承载的电流。

剩余电流动作保护电器的额定电流（A）值为：6，10，16，20，25，32，40，50，63，80，100，125，160，200，250，315，400，500，630，700 和 800。

(2) 额定剩余动作电流 $I_{\Delta n}$ 。额定剩余动作电流是制造厂对剩余电流动作保护电器规定的剩余动作电流值，在该电流值时剩余电流动作保护电器应在规定的条件下动作。

剩余电流动作保护电器的额定剩余动作电流（A）值为：0.006，0.01，0.03，0.05，0.1，0.3，0.5，1，3，5，10，20 和 30。

(3) 额定剩余不动作电流 $I_{\Delta n}$ 。额定剩余不动作电流是制造厂对剩余电流动作保护电器规定的剩余不动作电流值，在该电流值时剩余电流动作保护电器在规定的条件下不动作。

额定剩余不动作电流的优先值为 $0.5I_{\Delta n}$ ，如采用其他值时，应大于 $0.5I_{\Delta n}$ 。

(4) 额定工作电压 U_N 。剩余电流动作保护电器的额定工作电压（简称额定电压）是制造厂规定的与剩余电流动作保护电器的性能有关的电压值。

同一台剩余电流动作保护电器可以有几个额定电压。如果剩余电流动作保护电器具有短路分断能力时，不同的额定电压具有相应的额定短路分断能力。

额定电压的优选值：230V、400V（220V、380V 或 240V、415V）。

(5) 额定频率。剩余电流动作保护电器的额定频率是对剩余电流动作保护电器规定的以及其他特性值与之相应的电源频率。额定频率的优选值为：50/60Hz。

3.1.3 额定短路能力和短路电流性能

额定短路能力是制造厂对带过电流保护的剩余电流装置规定的极限短路分断能力。

家用带过电流保护的剩余电流断路器的短路分断能力在 25 000A 及以下,其标准值和优选值(A)为:1500,3000,4500,6000,10 000,15 000 和 20 000。

配电装置用的剩余电流断路器一般均具有短路分断能力,其短路分断能力应符合 GB 14048.2—2001 的规定。

不带短路保护的剩余电流动作保护电器,在使用时需要用一个短路保护电器保护,例如用熔断器、断路器来进行短路保护。短路电流由串联的短路保护电器来分断,但剩余电流动作保护电器应能承受短路保护电器在分断短路电流过程中产生的热应力和机械应力。该电流值称为限制短路电流,即被一合适的串联的短路保护电器保护的剩余电流动作保护电器在规定的使用和工作条件下能够承受的预期电流的交流分量值。

不带短路保护的剩余电流动作保护电器的限制短路电流的标准值和优选值(A)为:500,1000,1500,3000,4500,6000,10 000,20 000 和 50 000。

对于没有断开主电路功能的剩余电流动作保护电器,例如剩余电流监视器、剩余电流继电器等,则用短路耐受电流来表示其短路性能,即剩余电流动作保护电器在规定的使用和性能条件下,在规定的时间内,剩余电流动作保护电器能承载而不导致其损坏的电流。剩余电流动作保护继电器额定短时耐受电流的优先值(A)为:3000,4500,6000,10 000,15 000,20 000,25 000,30 000,40 000 和 50 000。

3.1.4 额定剩余接通和分断能力 $I_{\Delta n}$

表 2.9-2 RCCB 的分断时间和不驱动时间的标准值

型号	I_N (A)	$I_{\Delta n}$ (A)	剩余电流 (I_{Δ}) 等于下列值时的分断时间和不驱动时间标准值 (s)				
			$I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	$5I_{\Delta n}$ ①	5A, 10A, 20A, 50A, 100A, 200A, 500A	
一般型	任何值	任何值	0.3	0.15	0.04	0.04	最大分断时间
S 型	≥ 25	>0.030	0.5	0.2	0.15	0.15	最大分断时间
			0.13	0.06	0.05	0.04	最小不驱动时间

① 对 $I_{\Delta n} \leq 0.03A$ 的一般型,可用 0.25A 代替 $5I_{\Delta n}$ 。

表 2.9-3 RCBO 的分断时间和不驱动时间的标准值

型号	I_N (A)	$I_{\Delta n}$ (A)	剩余电流 (I_{Δ}) 等于下列值时的分断时间和不驱动时间标准值 (s)				
			$I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	$5I_{\Delta n}$ ①	5A, 10A, 20A, 50A, 100A, 200A, 500A	$I_{\Delta t}$ ②
一般型	任何值	任何值	0.3	0.15	0.04	0.04	0.04
S 型	≥ 25	>0.030	0.5	0.2	0.15	0.15	0.15
			0.13	0.06	0.05	—	0.04

① 对 $I_{\Delta n} \leq 0.03A$ 的一般型,可用 0.25A 代替 $5I_{\Delta n}$ 。

② $I_{\Delta t}$ 等于 B 型、C 型或 D 型 (适用时) 的过电流瞬时脱扣范围下限的电流时进行试验。

(3) 配电装置用剩余电流断路器 (CBR) 的分断时间。一般型 (无延时) CBR 的最大分断时间见表 2.9-4。

表 2.9-4 一般型 CBR 的最大分断时间

剩余电流	$I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	$5I_{\Delta n}$ ①	$10I_{\Delta n}$ ②
最大分断时间 (s)	0.3	0.15	0.04	0.04

① 对于 $I_{\Delta n} \leq 0.03A$ 的 CBR, $5I_{\Delta n}$ 可用 0.25A 取代。

② 按注①采用 0.25A 时,则 $10I_{\Delta n}$ 为 0.5A。

对于延时型,应规定 CBR 在 $2I_{\Delta n}$ 时的极限不驱动时间。最小极限不驱动时间标准值为 0.06s; 优选值 (s) 为:0.06, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 和 1。

极限不驱动时间为 0.06s 的延时型 CBR 的最大分断时间应符合表 2.9-5 的规定。

额定剩余接通和分断能力是制造厂规定剩余电流断路器在规定条件下能够接通、承载和分断的剩余预期电流的交流分量有效值。

对于家用剩余电流断路器,额定剩余接通和分断能力 $I_{\Delta n}$ 的最小值为 $10I_N$ 或 500A (两者取较大值)。

对于配电装置用剩余电流断路器,其额定剩余接通和分断能力一般不小于短路分断能力的 25%。

3.1.5 剩余电流动作保护电器的动作特性

剩余电流装置根据出现剩余电流时的动作时间可以分为两种型式。

一般型 (无延时) 剩余电流动作保护电器。无人为故意延时的剩余电流保护电器,主要作为分支线路和终端线路的保护用。

有延时的剩余电流动作保护电器。具有选择性的 S 型或延时型剩余电流动作保护电器,是专门设计的对某一剩余动作电流值,能达到一个预定的极限不驱动时间的剩余电流动作保护电器。延时型只适用于 $I_{\Delta n} > 0.030A$ 的剩余电流动作保护电器。延时型主要作为主干线或分支线的保护电器,可以与终端线路的保护电器配合,达到选择性保护的要求。

(1) 家用不带过电流保护的剩余电流断路器 (RCCB) 的分断时间和不驱动时间标准值见表 2.9-2。

(2) 家用带过电流保护的剩余电流断路器 (RCBO) 的分断时间和不驱动时间标准值见表 2.9-3。

表 2.9-5 极限不驱动时间为 0.06s 的延时型 CBR 的最大分断时间

剩余电流	$I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	$5I_{\Delta n}$	$10I_{\Delta n}$
最大分断时间 (s)	0.5	0.2	0.15	0.15

(4) 移动式剩余电流动作保护电器 (PRCD) 的最大分断时间。移动式剩余电流动作保护电器主要用于直接接触的补充保护, $I_{\Delta n} \leq 0.03A$, 因而只有一般型,没有延时型。移动式剩余电流动作保护电器的最大分断时间见表 2.9-6。

表 2.9-6 PRCD 的最大分断时间

剩余电流	$I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	$5I_{\Delta n}$	250A
最大分断时间 (s)	0.3	0.15	0.04	0.04

(5) 剩余电流继电器动作特性。剩余电流继电器的动作

特性见表 2.9-7。

表 2.9-7 剩余电流继电器的动作特性

型 式	剩余电流等于下列值时的分断时间和不驱动时间 (s)			
	$I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	$5I_{\Delta n}$	
一般型	0.2	0.1 ^①	0.04 ^①	最大分断时间
S 型 ^②	0.5	0.2	0.15	最大分断时间
	0.13	0.06	0.05	最小不驱动时间
延时型 ^③	延时时间的优选值 (s) 为: 0.4, 0.8, 1, 1.5, 2			

- ① 一般型的剩余电流继电器, 如制造厂规定与指定型号的机械开关电器组合起来使用, 则可以验证由剩余电流继电器和指定型号的机械开关电器组装成组合式剩余电流动作保护器后的分断时间。此时, $2I_{\Delta n}$ 时的分断时间不考核, $5I_{\Delta n}$ 时的分断时间为不大于 0.15s。
- ② S 型是延时型剩余电流继电器的一种特定型式, 其动作特性可与一般型剩余电流继电器匹配, 用作选择性保护。
- ③ 延时型剩余电流继电器的最小不驱动时间为规定延时时间的 50%。

(6) 剩余电流监视器动作特性。剩余电流监视器的动作特性应符合以下要求: 剩余电流等于或大于 $I_{\Delta n}$ 时的驱动时间不大于 10s。

(7) 其他剩余电流动作保护电器的动作特性。其他剩余电流动作保护电器如没有专门的产品标准规定 (如固定安装的剩余电流保护插座), 其动作特性应符合 GB 6829 规定的要求。如用于直接接触保护, 剩余电流动作保护电器的最大分断时间应符合表 2.9-8 的要求; 如用于间接接触保护, 最大分断时间应符合表 2.9-9 的要求。对延时型剩余电流动作保护电器, 延时时间的优选值 (s) 为: 0.2, 0.4, 0.8, 1, 1.5, 2 (延时型仅适用于 $I_{\Delta n} > 0.03\text{A}$ 的剩余电流动作保护电器)。

表 2.9-8 直接接触保护用的剩余电流动作保护电器的最大分断时间

$I_{\Delta n}$ (A)	I_N (A)	最大分断时间 (s)		
		$I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	0.25A
0.006	任何值	5	1	0.04
0.010		5	0.5	0.04
0.030		0.5	0.2	0.04

表 2.9-9 间接接触保护用的剩余电流动作保护电器的最大分断时间

$I_{\Delta n}$ (A)	I_N (A)	最大分断时间 (s)		
		$I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	$5I_{\Delta n}$
>0.03	任何值	2	0.2	0.04
	只适用于 ≥ 40	5	0.3	0.15

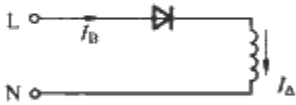
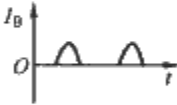
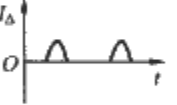
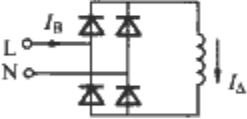

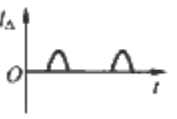
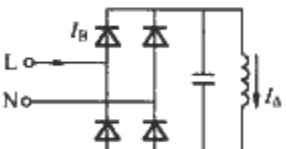
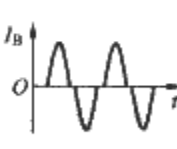
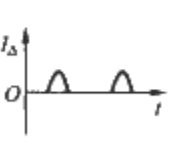
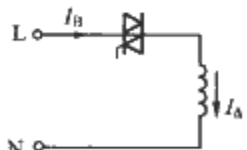
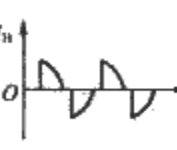
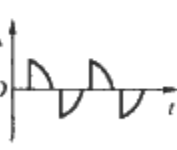
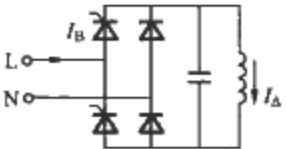
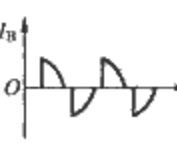
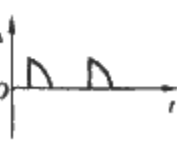
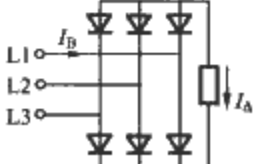

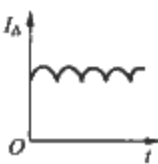
3.1.6 剩余电流含有直流分量时的动作特性

随着计算机、电子办公器具、家用电器及变频设备的日益增多, 在某些使用场合, 电气线路中出现脉动直流故障电流或平滑直流故障电流的情况也越来越多。当剩余电流中脉动直流或平滑直流的成分达到一定的程度时, 将影响检测装置的检测灵敏度, 使剩余电流动作保护电器的特性产生变化。

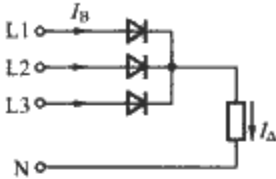

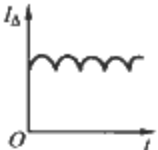
(1) 电子设备的整流电路可能产生的故障电流波形。

表 2.9-10 所列各种常用的整流电路中可能产生的负载电流和故障电流的波形。

表 2.9-10 各种常用的整流电路中可能产生的负载电流和故障电流的波形

带有故障的整流电路	负载电流波形	故障电流波形
半波整流 		
桥式整流 		
带滤波的桥式整流 		
对称相位控制 		
非对称相位控制 		
三相桥式整流 		

续表

带有故障的整流电路	负载电流波形	故障电流波形
三相星形整流 		

(2) 剩余电流含有直流分量时的动作特性分类。根据剩余电流含有直流分量时的动作特性不同, 剩余电流动作保护电器的特性可分为 AC 型、A 型和 B 型三种型式。


1) AC 型剩余电流动作保护电器。对突然施加或缓慢上升的剩余正弦交流电流能确保脱扣的剩余电流动作保护电器。AC 型剩余电流动作保护电器的检测原理如前文所述。


2) A 型剩余电流动作保护电器。对突然施加的或缓慢上升的剩余正弦交流电流和剩余脉动直流电流能确保脱扣的剩余电流保护电器。



A 型剩余电流动作保护电器的检测原理与 AC 型一样, 采用一个剩余电流互感器检测剩余电流, 但对互感器的磁特性进行了改善, 以提高对脉动直流电流的检测灵敏度。

3) B 型剩余电流动作保护电器。对突然施加的或缓慢上升的剩余正弦交流电流、剩余脉动直流电流和平滑直流电流均能确保脱扣的剩余电流动作保护电器。

剩余电流动作保护电器相应的产品标准规定, 剩余电流含有直流分量时剩余电流动作保护电器动作特性分类应在产品上有明显的标志, 以使用户能正确选用。具体标志如下:

AC 型剩余电流动作保护电器的标志符号, .

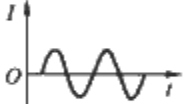

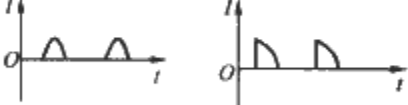
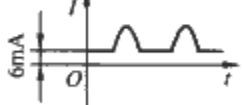


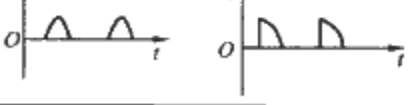
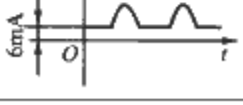

A 型剩余电流动作保护电器的标志符号, .

B 型剩余电流动作保护电器的标志符号, , .

或 .

(3) AC 型、A 型和 B 型剩余电流动作保护电器脱扣电流的波形和脱扣范围。各种型式的剩余电流动作保护电器只对相应的剩余电流能动作。AC 型剩余电流动作保护电器只能在交流剩余电流时能正确动作; A 型对交流剩余电流和脉动直流剩余电流都能正确动作; B 型不仅对交流剩余电流和脉动直流剩余电流能正确动作, 而且对平滑直流剩余电流也能正确动作 (B 型又称为全电流敏感型剩余电流动作保护电器)。因此对不同的使用场合应选用不同特性的剩余电流动作保护电器。当电气设备包含有较多的电子元器件时, 故障电流会含有脉动直流分量, 应选用 A 型剩余电流动作保护电器。对负荷带有变频器、三相交流整流器、逆变器、UPS 装置及特殊医疗设备 (例如: X 射线设备、CT) 等产生平滑直流剩余电流的电气设备, 应选用特殊的对脉动直流剩余电流和平滑直流剩余电流均能动作的 B 型剩余电流动作保护电器。AC 型、A 型和 B 型剩余电流动作保护电器的脱扣电流波形和脱扣范围见表 2.9-11。

表 2.9-11 AC 型、A 型和 B 型剩余电流动作保护电器脱扣电流波形和脱扣范围

型式	能脱扣的剩余电流和电流波形		脱扣电流范围
AC 型	交流剩余电流		$0.5I_{\Delta n} \sim I_{\Delta n}$
	交流剩余电流		$0.5I_{\Delta n} \sim I_{\Delta n}$
A 型	脉动直流剩余电流 (半波和相控半波电流)		$0.35I_{\Delta n} \sim 1.4I_{\Delta n}$ (或 $2I_{\Delta n}$) (电流滞后角 0°) $0.25I_{\Delta n} \sim 1.4I_{\Delta n}$ (或 $2I_{\Delta n}$) (电流滞后角 90°) $0.11I_{\Delta n} \sim 1.4I_{\Delta n}$ (或 $2I_{\Delta n}$) (电流滞后角 135°)
	半波电流叠加 6mA 平滑直流剩余电流		最大不超过 $1.4I_{\Delta n}$ (或 $2I_{\Delta n}$) + 6mA
	半波电流叠加 6mA 平滑直流的剩余电流		最大不超过 $1.4I_{\Delta n}$ (或 $2I_{\Delta n}$) + 6mA
B 型	交流剩余电流		$0.5I_{\Delta n} \sim I_{\Delta n}$
	脉动直流剩余电流 (半波和相控半波电流)		$0.35I_{\Delta n} \sim 1.4I_{\Delta n}$ (或 $2I_{\Delta n}$) (电流滞后角 0°) $0.25I_{\Delta n} \sim 1.4I_{\Delta n}$ (或 $2I_{\Delta n}$) (电流滞后角 90°) $0.11I_{\Delta n} \sim 1.4I_{\Delta n}$ (或 $2I_{\Delta n}$) (电流滞后角 135°)
	半波电流叠加 6mA 平滑直流的剩余电流		最大不超过 $1.4I_{\Delta n}$ (或 $2I_{\Delta n}$) + 6mA
	平滑直流 剩余电流		$0.5I_{\Delta n} \sim 2I_{\Delta n}$

3.2 分类

3.2.1 剩余电流断路器

剩余电流断路器是能检测剩余电流,将剩余电流值与基准值相比较,当剩余电流值超过基准值时使主电路触头断开的机械开关电器。剩余电流断路器可带有过载和短路保护,有的剩余电流断路器还可带有过电压保护。根据使用场合和操作人员不同,剩余电流断路器可以分为配电装置用剩余电流断路器(或称专业人员使用的剩余电流断路器)和家用和类似用途的剩余电流动作断路器(或称家用剩余电流断路器)。

(1) 配电装置用剩余电流断路器。配电装置用剩余电流断路器一般额定电流比较大,作为配电装置中主干线或分支线的保护开关,发生故障时影响范围比较大,要求由专业人员来安装、使用和维护。应符合 GB 14048.2 中附录 B 具有剩余电流保护的断路器(CBR)的规定。

这类剩余电流断路器一般由塑料外壳式断路器增加剩余电流动作保护功能派生而成,国内目前主要生产的型号有:SL、SA、CM1L、NS Vigi、Isomax S、NM1LE、CDM1L、RMM1L、SEL、DZ15L、DZL25 和 DZ20L 等系列产品,基本上都是电子式的剩余电流断路器。这类产品额定电流较大,除了剩余电流保护外,还具有过载和短路保护,可作为工厂、高层建筑、农村等配电装置主干线、分支线路的漏电、过载和短路保护电器。

配电装置用剩余电流断路器有整体式和拼装式两种型式。整体式的断路器部分和剩余电流元件位于一个外壳内(剩余电流元件内置),结构较为紧凑。拼装式由断路器和剩余电流附件拼装而成,制造厂将剩余电流附件作为断路器的外部附件提供给用户,由用户根据需要选购和拼装。剩余电流附件有垂直安装(装在断路器底部)和水平安装(装在断路器底侧面)两种形式,安装方便灵活,便于用户选用和改装,但体积较大。

国内目前生产的大部分为整体式的结构。早期的整体式剩余电流断路器是在断路器的基础上增大外壳尺寸,内置剩余电流元件派生而成,体积较大,代表性产品有 DZ15L、DZL25 和 DZ20L 等系列剩余电流断路器。随着电子技术和断路器技术的发展,近年来新开发了孪生式剩余电流断路器,剩余电流元件直接置在断路器内部。孪生式剩余电流断路器的外形尺寸和安装尺寸与同样电流等级的塑壳断路器完全一样,不仅大大缩小了剩余电流断路器的体积,而且便于配电柜标准化设计,安装维修更换方便。孪生式剩余电流断路器达到了小体积和高性能的要求,技术经济指标较高,在工农业配电装置中具有广阔的应用前景,代表性产品有 SA、SL、CM1L 系列剩余电流断路器等。

拼装式结构的剩余电流断路器目前国内较少见,主要是国外公司在中国的合资或独资企业生产的产品,代表性的产品有 NS Vigi、Isomax S 系列剩余电流断路器等。但从国内外产品发展趋势来看,新一代剩余电流断路器有向拼装式结构发展的趋势,剩余电流模块作为塑壳断路器的外部附件供货,在设计、生产、使用和维护等方面可能更为方便。

典型产品介绍:

1) SA 系列剩余电流断

路器。SA 系列剩余电流断路器的外形照片如图 2.9-14 所示,为孪生式剩余电流断路器。SA 系列剩余电流断路器采用智能化控制器,适用于交流 50Hz,额定工作电压为 400V 及以下,额定电流至 800A 的低压电网中,作为过载、短路、人身触电和设备漏电保护之用,也可防止因设备绝缘损坏产生接地故障电流而引起的火灾危险。该系列产品还采用了微处理器控制的智能化控制器,额定电流可调,具有预报警和通信功能。

主要技术参数:

壳架电流等级(A): 100, 225, 400 和 800 四个等级。

额定工作电压(V): 220~400。

极数: 3 极、4 极。

额定电流(A):

SA-100: 20~50, 50~100 可调。

SA-225: 100~225 可调。

SA-400: 200~400 可调。

SA-800: 300~630, 400~800 可调。

额定短路分断能力(kA): 35~100。

额定剩余动作电流(mA):

SA-100: 30, 100, 300。

SA-225: 30, 100, 300。

SA-400: 100, 300, 500, 100/300/500 可调。

SA-800: 100, 300, 500, 100/300/500 可调。

剩余电流动作时间: 无延时; 延时型($2I_{\Delta n}$ 时)为 0.06/0.3s 可调。

2) CM1L 系列剩余电流断路器。CM1L 系列剩余电流断路器的外形照片如图 2.9-15 所示,为孪生式剩余电流断路器。CM1L 系列剩余电流断路器适用于交流 50 Hz,额定工作电压为 400V 及以下,额定电流至 630A 的配电网中,作为线路及电源设备过载、短路等保护之用,也可作为人身触电和设备漏电保护之用,防止因设备绝缘损坏产生接地故障电流而引起的火灾危险。CM1L 系列剩余电流断路器还可设置为有消防漏电报警功能,发生漏电时只报警不断开。

主要技术参数:

壳架电流等级(A): 100、225、400 和 630 四个等级。

额定工作电压(V): 400。

极数: 3 极、4 极。

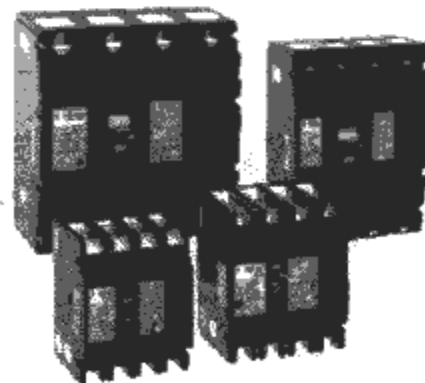


图 2.9-15 CM1L 系列剩余电流断路器

额定电流(A):

CM1L-100: 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100。

CM1L-225: 100, 125, 140, 160, 180, 200, 225。

CM1L-400: 225, 250, 315, 350, 400。

CM1L-630: 400, 500, 630。

额定短路分断能力(kA): 50~100。

额定剩余动作电流(A):

CM1L-100: 0.03/0.1/0.3/0.5, 0.1/0.3/0.5, 0.3/1/

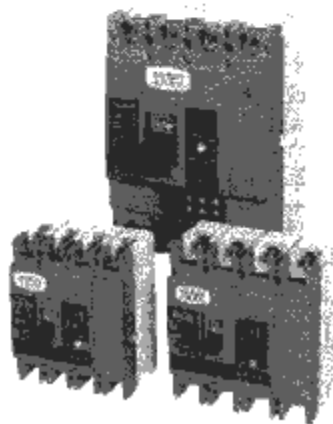


图 2.9-14 SA 系列剩余电流动作断路器外形

3/10 可调。

CM1L-225: 0.03/0.1/0.3/0.5, 0.1/0.3/0.5, 0.3/1/3/10 可调。

CM1L-400: 0.1/0.3/0.5, 1/3/10/30 可调。

CM1L-630: 0.3/0.5/1, 1/3/10/30 可调。

剩余电流动作时间: 无延时; 延时型 ($2I_{\Delta n}$ 时) 为 0.35/1/2s、0.25/0.9/1.9s 可调。

3) NS Vigicompact 系列剩余电流断路器。NS Vigicompact 系列剩余电流断路器的外形照片如图 2.9-16 所示, 由 NS 塑料外壳式断路器与 Vigicompact 剩余电流附件

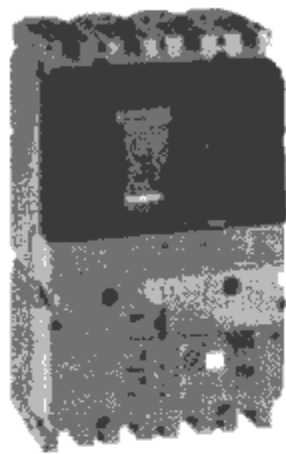


图 2.9-16 NS Vigicompact 系列剩余电流断路器

拼装而成。适用于交流 50 Hz, 额定工作电压为 550 V 及以下, 额定电流至 630 A 的低压电网中, 作为线路及电源设备过载、短路等保护之用, 也可作为人身触电和设备漏电保护之用, 防止因设备绝缘损坏产生接地故障电流而引起的火灾危险。NS 塑壳断路器还可采用微处理器控制的智能化控制器, 额定电流可调, 可派生预报警和通信等功能。

主要技术参数:

壳架电流等级 (A): 100、160、250、400 和 630 五个等级。

额定工作电压 (V): 200~400, 440~550。

极数: 3 极、4 极。

额定电流 (A):

NS Vigicompact 100: 12.5~100 可调。

NS Vigicompact 160: 12.5~160 可调。

NS Vigicompact 250: 12.5~250 可调。

NS Vigicompact 400: 160~400 可调。

NS Vigicompact 630: 250~630 可调。

额定短路分断能力 (kA): 25~150。

额定剩余动作电流 (A):

NS Vigicompact 100: 0.3, 0.03/0.3/1/3/10 可调。

NS Vigicompact 160: 0.3, 0.03/0.3/1/3/10 可调。

NS Vigicompact 250: 0.03/0.3/1/3/10 可调。

NS Vigicompact 400: 0.03/1/3/10/30 可调。

NS Vigicompact 630: 0.03/1/3/10/30 可调。

剩余电流动作时间:

NS Vigicompact 100、NS Vigicompact 160 有无延时型和延时型, 延时型 ($2I_{\Delta n}$ 时) 0/60/150/310ms 可调;

NS Vigicompact 250、NS Vigicompact 400、NS Vigicompact 630 只有延时型, 延时型 ($2I_{\Delta n}$ 时) 0/60/150/310ms 可调。

(2) 家用和类似用途的剩余电流断路器 (以下简称家用剩余电流断路器)。家用剩余电流断路器主要在商用、办公楼及城乡居民住宅等建筑物中, 作为线路设施的触电、漏电等接地故障保护用。一般额定电流小于或等于 125A, 作为终端电气线路的漏电保护电器, 适合于非专业人员使用。家用剩余电流断路器可分为带过电流保护和不带过电流保护两种。不带过电流保护剩余电流断路器符合 GB 16916.1—2003 的规定, 仅具有剩余电流保护功能, 不具有过载和短路保护功能, 简称为 RCCB。带过电流保护剩余电流断路器符合 GB 16917.1—2003 的规定, 除了具有剩余电流保护功能外, 还具有过载和短路保护功能, 简称为 RCBO。

RCCB 均为整体式产品, 目前国内主要生产的型号有

DZL43 (FIN)、NFIN、AJR (G)、5SM3、NL1 (E)-63、CDL7-63、F7、AB62、AB63 等系列剩余电流断路器。按脱扣形式 RCCB 有电磁式和电子式两种型式, 电磁式的代表产品有 DZL43 (FIN)、NFIN、5SM3、AB62 等; 电子式的代表产品有 AJR (G) 等。RCCB 按极数可分为 2 极和 4 极两种。近几年开发的同一系列的 RCCB, 除了宽度尺寸分别为 36mm 和 72mm 外, 其余尺寸均相同。RCCB 因为不带过电流保护, 结构紧凑、体积较小, 相对成本较低。RCCB 在使用时电路中需要另外安装过电流保护装置, 适用于线路中已有过电流保护, 仅需增加剩余电流保护的电路中使用。例如住宅配电的总进线开关采用 RCCB, 分支线路采用小型断路器进行过电流保护, 或总进线开关采用小型断路器, 在需要剩余电流保护的分支回路 (例如插座) 中采用 RCCB 保护。

RCBO 目前国内主要生产的型号有 C65 Vigicompact、DPN Vigicompact、D (G) S250S、D (G) 260S、FAZ-L、NB1L (E)、CDB1LE、CDL1、NDB1L、NDB2L、RMC1L、DZ30L、DZL118、DZ126L、DZ12L、DZ47L、KL 系列等。RCBO 按脱扣形式也有电磁式和电子式两种型式, RCBO 电磁式的代表产品有 C65 Vigicompact ELM、D260S、NB1L 等; 电子式的代表产品有 C65 Vigicompact ELE、G260S、NB1LE、NDB1L、NDB2L、CDB1LE 等。RCBO 按结构型式也有整体式和拼装式两种型式。整体式 RCBO 的机械开关部分和剩余电流元件内置在同一壳体中, 结构较为紧凑, 体积较小, 代表产品有 DPN Vigicompact、DZL118 等。拼装式 RCBO 由小型断路器与剩余电流附件横向拼装而成, 分别用 2 极、3 极和 4 极小型断路器与不同的剩余电流保护附件拼装成相应极数的 RCBO。拼装式 RCBO 分断能力高, 外形美观, 宽度尺寸模数化, 可以根据需要灵活地与小型断路器组合安装在终端配电箱中, 近几年发展迅速, 其产量已占家用剩余电流断路器产量的 1/3 以上。RCBO 的拼装可在制造厂装配完成, 也可由用户在现场拼装。现场拼装的 RCBO 在结构和标志等方面必须符合 GB 16917 对剩余电流附件规定的安全要求, 以便非专业人员正确地拼装, 确保产品安全使用。

近年来由于相线极和 N 极组合在一个壳体内的双极小型断路器 (宽度 18 mm) 的发展, 由双极小型断路器派生或拼装的相线极+N 极的 RCBO 也得到迅速发展。这类 RCBO 的额定电流为 32A, 2 极, 尺寸为 4 个模数 (36mm), 具有过载和短路保护及一定的短路分断能力, 非常适合于在住宅分支线路中作为过载、短路和剩余电流保护, 代表产品有 DPN Vigicompact、DZ30L、NDB1L 等。

典型产品介绍:

1) DZL43 (FIN) 系列剩余电流断路器。DZL43 (FIN) 系列剩余电流断路器的外形照片如图 2.9-17 所示,



图 2.9-17 DZL43 系列剩余电流断路器

为整体式、不带过电流保护的家用剩余电流断路器 (RCCB)。DZL43 (FIN) 设计先进, 构思新颖, 结构合理, 动作可靠, 动作功能与电源电压无关, 是电磁式剩余电流断路器。2 极和 4 极的外形尺寸相同。DZL43 (FIN) 适用于交流 50 Hz, 额定电压至 380 V, 额定电流至 63 A 的工矿企业、商业和家庭等领域的建筑物电气设施中作人身触电和设备

漏电保护之用, 也可防止因设备绝缘损坏产生接地故障电流而引起的火灾危险。

主要技术参数：
壳架电流等级 (A)：63。
额定工作电压 (V)：380 及以下。
极数：2 极、4 极。
额定电流 (A)：25，40，63。
额定限制短路电流 (A)：6000。
额定剩余动作电流 (A)：0.03，0.10，0.3，0.5。
剩余电流动作时间：无延时。

2) 5SM 剩余电流断路器。5SM 剩余电流断路器如图 2.9-18 所示，为家用不带过电流保护的剩余电流断路器 (RCCB)，结构形式为整体式。5SM 的动作功能与电源电压无关，是电磁式剩余电流断路器，适用于交流 50Hz，额定电压至 415V，额定电流至 80A 的工矿企业、商业和家庭等领域的建筑物电气设施中作人身触电和设备漏电保护之用，也可防止因设备绝缘损坏产生接地故障电流而引起的火灾危险。5SM 系列剩余电流断路器具有较强的抗电磁干扰能力，S 型的冲击耐受电流能力 ($8/20\mu\text{s}$) 可达到 5kA 以上。2 极剩余电流断路器的宽度为 36mm (额定电流 40A 及以下)，4 极的宽度为 72mm，高度和深度的尺寸相同。5SM 系列剩余电流断路器的右侧还可拼装辅助触点元件，辅助触点元件宽度为 9mm。

主要技术参数：
壳架电流等级 (A)：80。
额定工作电压 (V)：230、400。
极数：2 极、4 极。
额定电流 (A)：16，25，40，63，80。
额定限制短路电流 (A)：10 000。
额定剩余动作电流 (A)：0.01，0.03，0.10，0.3，0.5，1。
剩余电流动作时间：无延时、0.01s 短延时、S 型 ($2I_{\Delta n}$ 时延时 0.06s)。

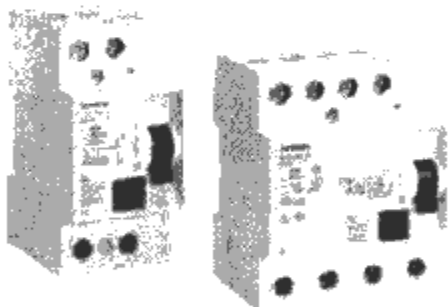


图 2.9-18 5SM 剩余电流断路器

3) C65 Vigi 剩余电流附件。如图 2.9-19 所示为 C65 Vigi 剩余电流附件，可与 C65 小型断路器拼装成带过电流保护的剩余电流断路器 (RCBO)，两者的拼装可在制造厂完成，也可由用户在现场拼装。C65 Vigi ELM 为电磁式，动作功能与电源电压无关，具有较强的抗干扰能力。C65 Vigi ELE (G) 为电子式，动作功能与电源电压有关，其中 C65 Vigi ELE (G) 可带有过电压保护。额定电流小于等于 40A 的剩余电流附件具有防误配设计，能防止它与额定电流大于 40A 的 C65 断路器拼装。

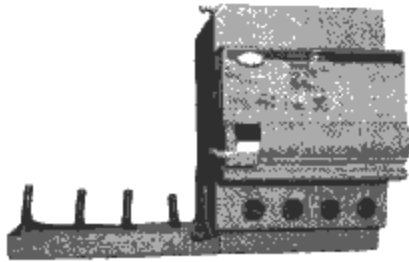


图 2.9-19 C65 Vigi 剩余电流附件

C65 Vigi 适用于交流 50Hz，额定电压至 400V，额定电流至 63A 的工矿企业、商业和家庭等领域的建筑物电气设施中作过载、短路、人身触电和设备漏电保护之用，也可防止因设备绝缘损坏产生接地故障电流而引起的火灾危险。

主要技术参数：
壳架电流等级 (A)：63。
额定工作电压 (V)：230/400。
极数：2 极、3 极、4 极。
额定电流 (A)：32，40，63。
额定短路分断能力 (A)：6000、10 000。
额定剩余动作电流 (A)：0.03、0.3。
剩余电流动作时间：无延时、S 型 ($2I_{\Delta n}$ 时延时 0.06s)。
工频过电压保护：280 ($1\pm 5\%$) V [仅 C65 Vigi ELE (G) 有]。

4) NB1LE-40 剩余电流断路器。NB1LE-40 剩余电流断路器如图 2.9-20 所示。NB1LE-40 剩余电流断路器为家用带过电流保护的剩余电流断路器 (RCBO)，由 NB1 小型断路器与电子式剩余电流附件拼装而成，动作功能与电源电压有关。适用于交流 50/60Hz，额定电压不超过 400V，额定电流至 40A 的工业、商业、高层建筑和民用住宅等场所的线路设施中，作为过载、短路、人身触电和设备漏电保护之用，也可防止因设备绝缘损坏产生接地故障电流而引起的火灾危险。

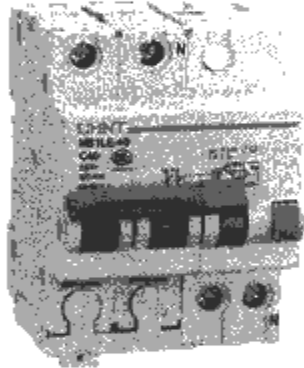


图 2.9-20 NB1LE-40 剩余电流断路器

主要技术参数：
壳架电流等级 (A)：40。
额定工作电压 (V)：230、400。
极数：1 极+N、2 极、3 极、3 极+N、4 极。
额定电流 (A)：6，10，16，20，25，32，40。
额定短路分断能力 (A)：6000。
额定剩余动作电流 (A)：0.03。
剩余电流动作时间：无延时。

5) DZ30L 剩余电流断路器。DZ30L 剩余电流断路器如图 2.9-21 所示，由 DZ30 双极小型断路器 (相线极+N 极) 与剩余电流附件拼装而成，宽度尺寸为 36 mm，是家用带过电流保护的剩余电流断路器 (RCBO)。DZ30L 为电子式剩余电流断路器，动作功能与电源电压有关。适用于交流

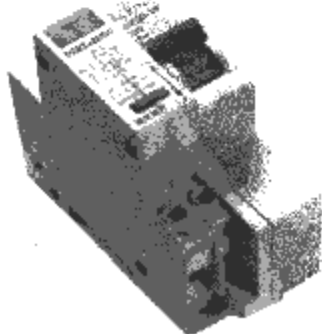


图 2.9-21 DZ30L 剩余电流断路器

50Hz, 额定电压为 230 V, 额定电流至 20A 的工业、商业、高层建筑和民用住宅等场所的线路设施中, 作为过载、短路、人身触电和设备漏电保护之用, 也可防止因设备绝缘损坏产生接地故障电流而引起的火灾危险。DZ30L 剩余电流断路器外形美观、尺寸紧凑, 尤其适用于终端配电箱, 作为分支线路的保护开关。DZ30L 可同时断开相线和中性线, 确保用电安全。

主要技术参数:

壳架电流等级 (A): 20。

额定工作电压 (V): 230。

极数: 1 极+N。

额定电流 (A): 10, 16, 20。

额定短路分断能力 (A): 3000。

额定剩余动作电流 (A): 0.03。

剩余电流动作时间: 无延时。

3.2.2 剩余电流继电器

剩余电流继电器是能检测剩余电流, 将剩余电流值与基准值相比较, 当剩余电流值超过基准值时, 发出一个机械触点开闭信号的剩余电流动作保护装置。剩余电流继电器可与其他机械开关电器或报警装置组合, 通过机械触点接通操作线圈使机械开关电器脱扣或使声光报警装置报警。

剩余电流继电器主要使用在石油化工、钢铁企业、消防、煤矿等需要连续供电场所的电气线路中, 作为漏电报警或绝缘监视之用, 发生漏电等接地故障时, 不断开主电路而发出一个报警信号通知值班人员检修。剩余电流继电器常和交流接触器或低压断路器组成组合式剩余电流动作保护电器, 用于在发生接地故障时切断主电路。这种形式的剩余电流切断装置组装比较灵活, 主要用在额定电流较大的线路保护中。目前我国农村低压电网的接地故障保护中, 常采用剩余电流继电器与接触器的组合装置作为变压器的总保护断路器或分支线路保护断路器。

国内主要生产的型号有 JD6、JD10、JD38、JD42、JD46、LJYII、LJM、SDLB-9、DBL、CDJD2 等, 主要是电子式剩余电流继电器, 控制部分可由主电源供电也可由另外的辅助电源供电。剩余电流继电器的额定电流可以从几十安培至几千安培, 符合 JB 8756—1988 的规定。结构形式也有整体式和分体式两种。整体式的检测电流互感器内置, 与主体控制部分构成一个整体, 体积较小; 但安装时主电路必须通过剩余电流继电器本体, 适用于额定电流较小的剩余电流继电器。分体式的检测电流互感器外置, 与主体控制部分分别为两个元件, 安装时二者可分开安装, 互感器可安装在被保护线路的任何合适位置, 输出信号通过导线与控制部分连接; 对不同额定电流的线路, 只需更换不同贯穿孔径的互感器, 安装方便灵活, 适用于额定电流较大的配电线路中使用的剩余电流继电器。

典型产品介绍:

(1) JD6-6 剩余电流继电器。JD6-6 剩余电流继电器如图 2.9-22 所示, 是电子式剩余电流继电器。结构形式为分体式剩余电流继电器, 检测电流互感器外置, 更换不同贯穿孔径的互感器可满足额定电流线路的需要, 互感器通过专用插头与主体控制部分连接并有自检功能, 电气连接故障时可报警。适用于交流 50Hz, 额定电压 380V, 额定电流至 630A 的配电线路中, 作为电气线路和设备的漏电保护之用, 也可防止因设备绝缘损坏产生接地故障电流而引起的火灾危险。在需要剩余电流切断的电路中, JD6-6 剩余电流继电器可以与接触器或断路器配合使用, 组成剩余电流断开装置。

在需要进行漏电报警时, JD6-6 剩余电流继电器可连接报警装置对剩余电流进行监视, 在检测到接地故障时发出报警信号。

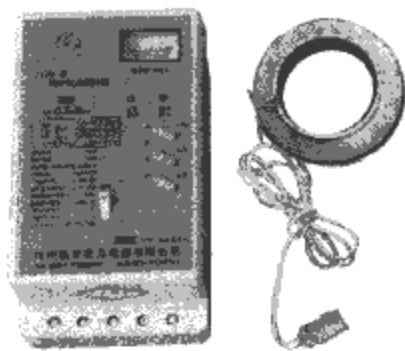


图 2.9-22 JD6-6 剩余电流继电器

主要技术参数:

主电路额定电压 (V): 380。

辅助电路额定电压 (V): 380。

额定电流 (A): 63~630。

检测电流互感器: 外置式。

检测电流互感器孔径: 有三种贯穿孔径, $\phi = 44\text{mm}$ ($I_N \leq 250\text{A}$)、 $\phi = 60.5\text{mm}$ ($250\text{A} < I_N \leq 400\text{A}$)、 $\phi = 83.5\text{mm}$ ($400\text{A} < I_N \leq 630\text{A}$)。

额定短时耐受电流 (A): 3000。

额定剩余动作电流 (A): 0.1, 0.3, 0.5, 0.8 可调。

剩余电流动作时间 (s): 无延时; 延时型, 0.06, 0.8, 1.8 可调。

(2) LJM 剩余电流继电器。如图 2.9-23 所示为 LJM 剩余电流继电器, 采用高性能 DSP 数字处理器进行信号处理, 可显示漏电电流值和漏电电流相位。剩余电流动作值、剩余电流报警值、动作时间等可通过键盘设置。LJM 具有 RS485 通信接口, 可远程读取继电器的数据或进行远程控制, 因此可用于漏电火灾报警系统。电流检测互感器铁心采用高磁导率软磁合金材料制成的环形铁心, 具有优良的平衡特性, 大功率设备投运时不会误动作。



图 2.9-23 LJM 剩余电流继电器

LJM 剩余电流继电器适用于交流 50Hz, 额定电压至 380V, 额定电流至 400A 的中性点直接接地的低压配电系统, 对线路进行接地故障保护, 防止用电设备事故及防止电气火灾的发生, 也可用来对人身提供间接接触的电击保护。LJM 可与交流接触器、低压断路器相配合组成剩余电流断开装置, 也可与报警装置配合组成剩余电流报警装置。

主要技术参数:

主电路额定电压 (V): 380。

辅助电路额定电压 (V): 220。

额定电流 (A): 150~400。

检测电流互感器: 外置式。

检测电流互感器孔径: 贯穿孔径为 $\phi = 41\text{mm}$ (适用 150A、250A) 和 $\phi = 64\text{mm}$ (适用 250A、400A)。

重合闸时间 (s): 20~60。

额定剩余动作电流 (A): 0.01~0.99 可调。

剩余电流动作时间: S 型: 延时型, 延时时间 +0.2s (延时时间可设定)。

3.2.3 剩余电流监视器

剩余电流监视器是能检测剩余电流, 将剩余电流值与剩余动作电流值相比较以及当剩余电流超过剩余动作电流值时提供一个规定的报警信号等功能的装置。它主要用来监视设备中的剩余电流, 并在带电部件与外露的导电部件或地之间的剩余电流超过预定值时发出报警信号。

剩余电流监视器在功能上相当于剩余电流继电器与报警装置的组合, 但剩余电流监视器指示故障的报警装置是内置的, 并对报警装置的形式、性能有严格要求, 以确保报警的可靠性。例如, 剩余电流监视器主要的指示装置应是可视的并且与装置本身构成一个整体部分, 当剩余电流监视器按正常使用安装时, 应易于从前面加以识别, 当故障存在时应不可能取消可视报警。剩余电流监视器的互感器可内置, 也可外接, 或既有内置互感器也可外接互感器。

剩余电流监视器适用于供电连续性要求较高或不能立即断开电源的线路中, 发生接地故障时不断开电路发出报警信号。剩余电流监视器也可用在 IT 系统中, 监视电路中的接地故障电流, 避免二次接地故障的接地电弧引起火灾或爆炸的危险。

以前我国这类产品较少, 也没有这类产品的标准。近年来, 随着用电和住宅建筑的发展, 对低压配电线路的剩余电流保护及漏电电气火灾保护的要求越来越高, 有关用电规程规定在停电会造成重大经济损失及不良社会影响的电气装置或场所, 应安装报警式剩余电流保护装置, 例如公共场所的应急电源、通道照明; 确保公共场所安全的设备; 消防设备的电源, 如消防电梯、消防水泵、消防通道照明等; 防盗报警的电源等场所等, 使剩余电流监视器产品有了较大的发展。剩余电流监视器应符合 GB 19214—2003 的规定。

剩余电流监视器与 IT 系统中常用的绝缘监视器有区别, 剩余电流监视器的监视功能是无源的, 并只能响应被监视装置的不平衡故障电流, 例如当三相线路有同样的接地故障电流时, 剩余电流监视器是不能检测的。而绝缘监视器的监视和测量功能是有源的, 工作时需要对被监视回路施加一个电压。绝缘监视器不仅能测量设备中平衡的绝缘电阻, 也能测量不平衡的绝缘电阻。

典型产品介绍:

如图 2.9-24 所示为 RD2 系列剩余电流监视器, 检测剩余电流采用外接互感器。RD2 系列剩余电流监视器适用于交流 50/60Hz, 额定电压至 400V, 最大额定电流至 630A 的配电线路中, 用于监视设备及系统中的剩余电流, 并在带电部件与外露的带电部件或地之间的剩余电流超过预定剩余电流值时发出报警信号。主要应用场合: 医疗设备的剩余电流监视, 建筑配电系统防火灾剩余电流监视和特殊场所的剩余电流监视。

RD2 系列剩余电流监视器检测到剩余电流时, 内置的红色指示灯点亮报警, 外部故障排除后, 报警信号才能复位。RD2 系列剩余电流监视器还设置有大功率输出继电器, 执行远程报警, 或需要时可与接触器、带有分励脱扣功能的断路器配合对配电系统中的各类接地故障进行保护性分断。

主要技术参数:

额定电压 (V): 230、400。

额定电流 (A): 630。

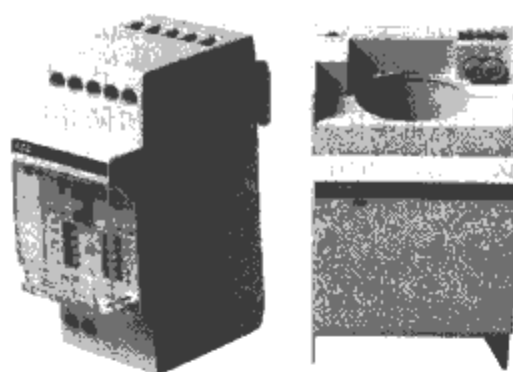


图 2.9-24 RD2 系列剩余电流监视器

检测电流互感器: 外置式, 互感器孔径 ϕ (mm) 有 29, 35, 60, 80 和 110。

额定剩余动作电流 (A): 0.03, 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2 可调。

剩余电流动作时间 (s): 0, 0.3, 0.5, 1, 2, 5 可调。

可视报警信号: 红色指示灯点亮。

输出触点型式: 一动合一动断。

剩余电流含有直流分量时的动作特性: A 型。

3.2.4 移动式剩余电流保护电器

移动式剩余电流保护电器由一个插头、一个剩余电流装置和一个或几个插座或接线器件组成。不带过电流保护的剩余电流保护电器, 其动作功能也有与电源电压有关或与电源电压无关 (即电子式和电磁式) 两种型式, 主要用来对其下端的电路中的移动电器提供直接接触电击危险保护。移动式剩余电流保护电器的额定剩余动作电流应不超过 0.03 A。移动式剩余电流保护电器主要包括剩余电流保护插头、剩余电流保护过渡转换器、移动式剩余电流保护插座和在线式移动式剩余电流保护电器等, 移动式剩余电流保护电器应符合 GB 20044 的规定。

国内目前主要生产的产品有剩余电流保护插头和移动式剩余电流保护插座等, 主要用作电热水器、电吹风机、手持式电动工具等移动电气器具的电源插头或家用电器及办公电气器具的电源插座, 防止使用时发生人身触电事故。主要生产型号有: CL1-10、BLC、LBX、LBC、CL1-10、CDLP1-16、NLB5-16、QLK、ATL、WLT-1、THD10 型剩余电流保护插头, LDC139V 移动式剩余电流保护插座等。剩余电流保护插头外壳采用高强度的工程塑料, 外形轻巧美观, 体积较小。除了具有剩余电流保护外, 有的剩余电流保护插头还具有保护接地回路保护, 当保护接地回路有故障电流时可同时将带电回路和接地回路断开, 防止接地回路的电流产生的事故。有的剩余电流保护插头还可带有过热保护传感器, 对电热器具进行过热保护。

典型产品介绍:

LBX-III 系列剩余电流保护插头的外形照片如图 2.9-25 所示, 采用扁型三极插头构造, 外壳为阻燃性材料制造, 具有功耗低, 灵敏度高, 温度、工作电压范围广等特点。适用于交流 50Hz, 额定电压为 230V, 额定电流至 16A 的单相电路中。对用电设备进行直接接触的电击保护, 也可对接地故障电流引起的火灾危险提供保护。LBX-III 对保护接地线和带电导线错接引起的外壳带电、相线和保护接地极短路等故障均能提供安全、有效的保护, 当插座接触不良导致温升过高仍可正常工作, 插头温升过高达到设定温度时, 预警灯就自动点亮, 如温度再升高达到极限温度 (插脚超过 200℃) 时自动断电。断电后预警指示灯会继续保持较长时间的点亮, 指示用户要及时更换不良插座才能正常使用。

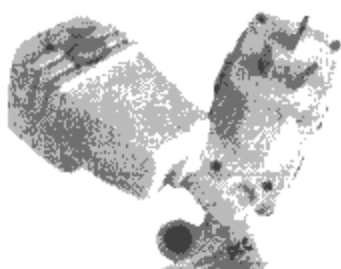


图 2.9-25 LBX-III 系列剩余电流保护插头

主要技术参数:

壳架电流等级 (A): 16。

额定工作电压 (V): 230。

极数: 2 极+接地极。

额定电流 (A): 10、16。

额定限制短路电流 (A): 3000。

额定剩余动作电流 (A): 0.01, 0.015, 0.030。

额定接通分断能力 (A): 250~300。

剩余电流动作时间: 瞬时动作 ($I_{\Delta n}$ 时, 不大于 0.1s; 250mA 时, 不大于 0.04s)。

保护接地线带电故障时动作时间: 不大于 0.04s。

耐受温度: 150℃ 以下, 插脚温升超过 200℃ 时断电。

3.2.5 固定式剩余电流保护插座

固定式剩余电流保护插座是由固定式插座和剩余电流装置组成的保护电器, 也可对移动电器设备提供电击危险保护。这类产品国内使用较少, 在北美, 例如美国和加拿大等国家使用较多 (在美国称为接地故障断路器, 简称 GFCI, 符合美国的 UL943 标准)。GFCI 基本上均为电子式剩余电流动作保护电器, 不带过电流保护, 主要是安装在厨房、浴室、酒店客房等场所的插座回路中, 对插入插座回路中的用电设备提供直接接触电击危险保护, 也能对接地故障电流引起的火灾危险提供保护。美国 UL 标准规定的 GFCI 还具有负载侧中性线重复接地故障保护, 当负载侧中性线发生重复接地时还能提供电击保护。

国内制造厂前几年生产的固定式剩余电流保护插座主要是出口北美市场, 按美国的 UL 标准及北美的插头插座系统生产。近几年已有按我国的扁插头插座系统生产的固定式剩余电流保护插座, 主要型号有 GPRRO-10A 等, 符合 GB 6829、GB 2099.1—1996《家用和类似用途插头插座 第一部分: 通用要求》、GB 1002—1996《家用和类似用途单相插头插座型式、基本参数和尺寸》。

典型产品介绍:

GPRRO-10A 固定式剩余电流保护插座如图 2.9-26 所示, 为嵌入式安装的固定式插座, 采用 115mm×70mm 的标准面板, 带一个两极插座和一个两极带接地插座。适用于交流 50Hz, 额定电压为 230V, 额定电流至 10A 的单相线路中, 对插入插座回路中的用电设备提供电击保护, 也可对绝缘损坏产生的接地故障电流引起的火灾危险提供保护。



图 2.9-26 GPRRO-10A 固定式剩余电流保护插座

主要技术参数:

额定工作电压 (V): 120~230。

极数: 2 极、2 极+接地极。

额定电流 (A): 10。

额定剩余动作电流 (A): 0.06。

额定接通和分断能力 (A): 500。

额定限制短路电流 (A): 3000。

剩余电流动作时间: 瞬时动作。

4 剩余电流动作保护电器的功能及应用方式

4.1 剩余电流动作保护电器的用途

4.1.1 电击保护

用剩余电流动作保护电器进行电击保护时, 应按基本保护 (直接接触保护) 和故障保护 (间接接触保护) 两种不同要求进行选用。

(1) 直接接触电击保护。直接接触电击保护的基本保护措施应是绝缘、隔离距离、设置护栏等, 例如带电导线外面应有绝缘层保护, 用电设备应有适当的绝缘外壳, 防止人触及带电部件发生电击事故。当基本电击保护措施失效时, 例如绝缘损坏或疏忽触及带电部分发生电击事故时, 额定剩余动作电流小于等于 30mA 的剩余电流动作保护电器也可以作为直接接触电击的补充保护或后备保护措施。用于直接接触电击保护时应选用一般型 (无延时) 的剩余电流动作保护电器。但剩余电流动作保护电器不能对相线与相线之间或相线与 N 线之间产生的电击事故进行保护。直接接触电击保护的示意图如图 2.9-27 所示。

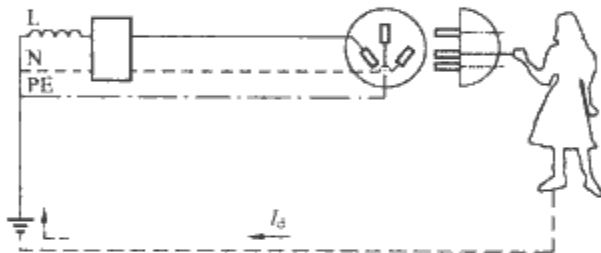


图 2.9-27 剩余电流动作保护电器用于直接接触电击保护示意图

在发生直接接触电击事故时, 剩余电流流过人身, 容易发生致命的触电危险。根据 IEC 60479 的研究结果, 15~100Hz 交流电流对人体的作用和影响可分为四个电流区域, 如图 2.9-28 所示。其中区域 ① 通常人体没有感觉, 区域 ② 通常无有害的生理效应, 区域 ③ 通常不会产生器官损伤, 但随着时间和电流增加, 可能发生心房纤维性颤动和心脏短暂停搏等, 区域 ④ 的电流—时间值是最危险的, 因为这个区域会出现心室纤维性颤动, 心脏的搏动节律受阻, 影响大脑的血液流通而引发死亡。因此直接接触电击保护的目的是要防止电流对人体的作用和影响落入区域 ④, 为此必须选用 $I_{\Delta n} \leq 30\text{mA}$ 及动作时间为一般型 (无延时) 的剩余电流动作保护电器。

人在直接接触带电导体时, 流过人体的电流值取决于人体内部电阻和站立地点的接触电阻。对触电死亡事故的研究表明, 可认为最不利的情况时站立点的接触电阻接近于零, 例如赤脚站在潮湿的地上。这时流过人体的电流仅取决于人体的电阻。试验研究表明, 人体电阻主要是决定于接触部位上的皮肤状态与电流途径。测量结果得出, 例如电流途径为左手至脚或左手至右手, 其电阻值约为 1000Ω 。考虑到对地故障电压为 220V, 则此时的电流值达 220mA 左右。这时如使用 $I_{\Delta n} \leq 30\text{mA}$ 的一般型剩余电流动作保护电器, 则在 220mA 时能在 40ms 内动作。由图 2.9-28 可以看出, 这时间—电流对应的点 A 是落在区域 ③, 这区域一般不会产生器官损伤, 在短时间内脱离电源也不会发生心室纤维性颤动, 因此一般情况下不会发生电击伤亡事故。

图 2.9-28 中还画出了额定剩余动作电流 10mA 和 30mA

的一般型（无延时）剩余电流保护电器的脱扣动作时间—电流特性曲线带，从图可以看出脱扣时间—电流特性曲线带大部分位于区域②，一小部分位于区域③，因此不会发生致命的电击危险事故。而使用额定剩余动作电流大于30mA的剩余电流动作保护电器，时间—电流特性曲线带将要进入区域④，则有可能产生电击伤亡事故。

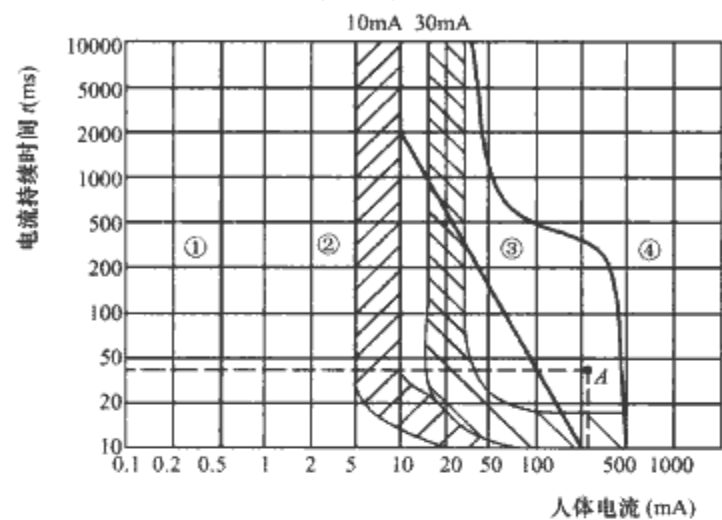


图 2.9-28 交流电流对人体的影响和 30mA 及以下的剩余电流断路器的保护区域

- ①——一般无感觉；②——通常无危险的病理生理反应；
③——通常无心室纤维性颤动；④——有心室纤维性颤动

此外，根据试验结果和实际的电击事故表明，较大的电流流过人体时，电流途径中的肌肉会发生痉挛，使触电者握住带电的导体而不能自行摆脱。IEC 60479 的研究结果又表明，摆脱电流与频率有关，在电网频率 50Hz 及 10mA 电流时，有 99.5% 的被试人员能摆脱。因此，通常认为在 50Hz 交流时，摆脱电流极限为 10mA。由此可见，在直接接触电击保护中，如要考虑能自行摆脱带电导体，应选用 10mA 的剩余电流动作保护电器。如直接接触的对象是小孩或病人，心室颤动的阈值可能较低，容易发生心室颤动，这时也应选用 $I_{\Delta n}$ 小于等于 10mA 的剩余电流动作保护电器。

(2) 间接接触电击保护。剩余电流动作保护电器的主要功能是间接接触电击保护。

在 GB 13955—2005《剩余电流动作保护装置安装和运行》中对间接接触电击事故防护规定：“间接接触电击事故防护的主要措施是采用自动切断电源的保护方式，以防止由于电气设备绝缘损坏发生接地故障时，电气设备的外露可接近导体持续带有危险电压而产生电击事故或电气设备损坏事故。当电路发生绝缘损坏造成接地故障，其故障电流值小于过电流保护电器的动作电流值时，应安装剩余电流动作保护电器。”该规定明确了间接接触电击保护的涵义和保护方式。在很多场合下，接地故障电流远小于过电流保护动作值，过电流保护装置不会动作。在这种情况下，采用剩余电流动作保护电器自动切断电源是一种非常有效的间接接触电击保护方式。

剩余电流动作保护电器用于间接接触电击保护的示意图如图 2.9-29 所示，电气设备上出现绝缘故障时，外壳出现故障电压，通过 PE 保护导线 [TN 系统，如图 2.9-29 (a) 所示] 或设备的接地极 [TT 系统，如图 9-29 (b) 所示] 产生一个故障电流，剩余电流动作保护电器在还未触及带电的金属外壳前已将故障切断，防止人体触及危险的接触电压。如出现故障时正好有人触及因故障而带电的设备外壳，则触电者的接地回路与设备故障的接地回路相并联。根据保护导线（或接地回路）和人体的电阻比例（正常情况下，人

体电阻要比保护导线或接地回路的电阻大得多），大部分的电流流经保护导线或接地回路，剩余电流动作保护电器立即切断电源，对人体也不会造成致命危险。

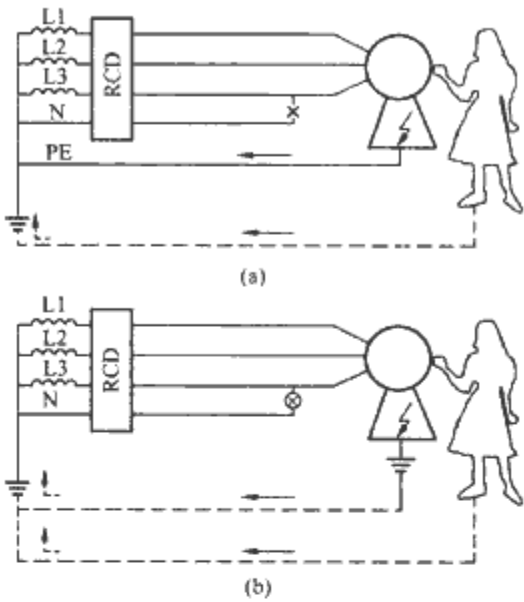


图 2.9-29 剩余电流动作保护电器用于间接接触电击保护示意图
(a) TN 系统；(b) TT 系统

剩余电流动作保护电器用于间接接触电击事故防护时，应正确地与电网的系统接地型式相配合。

1) TN 系统。剩余电流动作保护电器用于 TN 系统时，剩余电流动作保护电器负载侧的中性线（N 线）和保护导线（PE 线）不能共用。因此，在 TN-C 系统使用剩余电流动作保护电器时，应根据电击防护措施的具体情况，将电气设备外露可接近导体独立接地，形成局部 TT 系统，或将 TN-C 系统改造为 TN-C-S、TN-S 系统或局部 TT 系统后，才可安装使用剩余电流动作保护电器。在 TN-C-S 系统中，剩余电流动作保护电器只允许使用在 N 线与 PE 线分开部分。

根据 GB 16895.21—2004《建筑物电气装置 第 4-41 部分：安全防护—电击防护》的规定，间接接触保护时，TN 系统的最大分断时间应符合表 2.9-12 的规定。

表 2.9-12 间接接触保护时 TN 系统的最大分断时间

U_0 (V)	分断时间 (s)
120	0.8
230 (220)	0.4
277	0.4
400 (380)	0.2
>400	0.1

并应符合

$$Z_s I_a \leq U_0 \tag{2.9-9}$$

式中： Z_s 为包括电源、电源到故障点之间的带电导体以及故障点到电源之间的保护导体阻抗在内的阻抗， Ω ； U_0 为对地标称交流电压有效值，V； I_a 为保证保护电器在表 2.9-12 规定的相应时间内自动断开的电流（对剩余电流动作保护电器即为 $I_{\Delta n}$ ），A。

因此，当剩余电流保护电器用于间接接触保护时，动作电流与故障回路或接地极和保护导线的阻抗有关。在 TN 系统中，因为故障回路的阻抗较小，即使在线路较长且截面较小的配电线路，选用 $I_{\Delta n}$ 为几百毫安至几十安培的剩余电流动作保护电器均能满足式 (2.9-9) 的要求。在 TN 系统中，分断时间必须符合表 2.9-12 的要求，如相对地电压为 230V 时，则分断时间不应大于 0.4s。

2) TT 系统。TT 系统的电气线路或电气设备应装设剩余电流动作保护电器作为防电击事故的保护措施。

按 GB 16895.21—2004 规定,对 TT 系统的间接接触保护应满足条件

$$R_A I_a \leq 50V \tag{2.9-10}$$

式中: R_A 为接地极和外露可导电部分的保护导体电阻之和, Ω ; I_a 为使保护电器自动断开的电流 (对剩余电流动作保护电器即为 $I_{\Delta n}$), A; 50V 为在一般情况下,允许的接触电压极限值。

在 TT 系统中,接地极的阻抗按规程的要求应小于 4Ω ,但实际上很难做到。考虑到较为恶劣的使用条件,接地电阻要保持在几十欧姆至几百欧姆以下是没有困难的,因此要满足式 (2.9-10) 的要求,可以选用 $I_{\Delta n}$ 为 100~500mA 的剩余电流动作保护电器。在 TT 系统中,为了满足选择性保护的要求,允许分断时间不能超过 1s。

4.1.2 电气火灾的防护

(1) 电气火灾的产生。我国的火灾事故中,电气火灾事故占了相当大的比例,约占火灾总数的 30%左右,成为消防工作中一个非常突出的问题。电气火灾大部分是由于绝缘老化造成的电气短路或接地故障引起的。对于相与相之间或相与 N 线之间的短路,或较大的接地故障电流可用过电流保护或短路保护装置来保护。而当故障回路具有较高的电阻,或电弧性接地故障时,故障电流较小,使得前接的过电流保护电器 (如熔断器或小型断路器等) 不能排除这类故障。通常电气设备绝缘损坏产生电弧性接地故障的情况有:导线和电气设备绝缘老化;电器或电动机的接线端子周围绝缘因长期发热而炭化;电动机过载或老化而发生匝间短路;电气设备受潮或严重凝露;在电气设备中有导电尘埃沉积等。这种情况下,故障电流或电弧长期持续,容易使绝缘发生热击穿或电弧直接引燃附近的可燃材料造成电气火灾事故。

(2) 剩余电流动作保护电器对电气火灾的防护作用。剩余电流动作保护电器对由于过电流保护电器不动作而持续存在的接地故障电流引起的火灾危险也能提供保护。因为在过电流动作保护电器不动作的情况下,剩余电流动作保护电器能有效地切断接地故障电流,防止火灾事故的发生。

应用剩余电流动作保护电器来防止电气火灾,必须正确选择额定剩余动作电流。在 GB 16895.2—2005《建筑物电气装置 第 4-42 部分:安全防护—热效应保护》中规定:“在有火灾危险的场所,要防止故障电流引起火灾,必须在线路中装设额定剩余动作电流不超过 500mA 的剩余电流动作保护电器,或装设绝缘监察装置,在绝缘故障时发出警报。”

根据有关资料介绍,当绝缘故障产生的泄漏电流的发热功率达到 60~100W,并释放在几个平方毫米面积上时,该能量所产生的温度就会引燃绝缘,此时只要周围有可燃材料就会引起火灾。

采用额定动作电流不超过 500mA 的剩余电流动作保护电器,可以在出现引燃火灾所需的能量前,就分断电路排除故障。如图 2.9-30 所示的供电线路包含有火灾危险的绝缘故障,用电设备通过故障回路的电阻 R_{iso} 流过一个故障电流 I_c ,供电线路采用过电流保护电器 (小断路器、熔断器等) 或剩余电流动作保护电器进行保护。当应用不同的保护电器时,可能出现的最大持续电流 I_c ,以及在额定电压下发热功率 P_N 的比较见表 2.9-13。

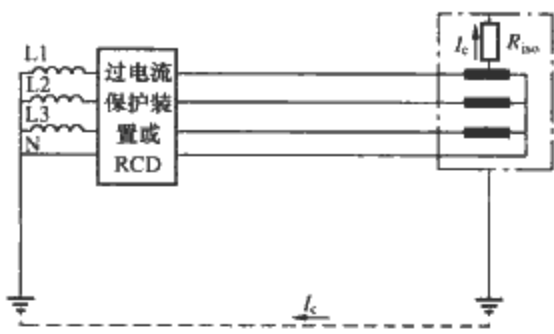


图 2.9-30 应用过电流或剩余电流动作保护电器防止火灾

表 2.9-13 应用不同保护电器时可能出现的最大持续电流和发热功率比较

保 护 电 器	可能的最大持续电流 I_c (A)	在 $U_N=220V$ 发热功率 P_N (W)
熔断器 (10A)	15	3300
小型断路器 (B、C 特性, 16A)	18	3960
剩余电流断路器 $I_{\Delta n}=500mA$	0.5	110
剩余电流断路器 $I_{\Delta n}=300mA$	0.3	66
剩余电流断路器 $I_{\Delta n}=30mA$	0.03	6.6

注 引燃火灾所需的最低功率 $P=60\sim100W$ 。

从表 2.9-13 可以看出,采用额定剩余动作电流小于等于 500mA 的剩余电流动作保护电器,可以确保在接地故障电流的发热功率达到 60~100W 以前切断电路 (或发出报警信号),有效地防止电气火灾的发生。前面所述的用于直接接触和间接接触保护的剩余电流动作保护电器,只要符合这个要求均具有防止电气火灾的功能。

(3) 剩余电流动作电气火灾监控装置及其应用。为防止电气设备或线路因绝缘损坏引起的电气火灾,应装设当接地故障电流超过预定值时,能发出报警信号或自动切断电源的剩余电流动作保护电器。电气火灾防护不仅适用于含有火灾危险的场所,在一般电气线路中也应考虑电气火灾保护,因为任何供电系统在绝缘损坏时都有可能引燃火灾的接地故障电流。安装剩余电流保护的监控装置时,应对建筑物内防火区域作出合理的分布设计,确定适当的控制保护范围。剩余动作电流的预定值和预定动作时间,应满足分级保护的配合要求。

单纯从减少发热功率效果来看,额定剩余动作电流在 300mA 或 500mA 以下,越小保护效果越好。但动作电流的选择还要考虑到电网和用电设备的正常泄漏电流,当剩余电流动作保护电器的动作电流小于电路的正常泄漏电流时,剩余电流动作保护电器就不能投入正常运行或者经常误动作而破坏供电的可靠性。

GB 50096—1999《住宅设计规范》规定,每幢住宅的总电源进线断路器应具有漏电保护功能,其功能主要是作为电气火灾监控和接地故障保护。当每幢住宅的户数较多时,考虑到正常的泄漏电流,应选用 100~300mA 的剩余电流动作保护电器,可采用剩余电流切断方式或报警方式。采用切断方式时应采用延时型剩余电流断路器。每户住宅用作电击保护的剩余电流断路器,额定剩余动作电流一般小于等于 30 mA,也具有电气火灾防护功能,可与住宅总电源进线处的剩余电流动作保护电器构成二级保护的剩余电流火灾监控网络。

对于大型建筑物可设置剩余电流火灾监控系统,系统可由剩余电流监视器(或剩余电流继电器、剩余电流式电气火灾监控探测器)和电气火灾监控设备组成。剩余电流监视器等可安装在配电系统变压器出线端(或变压器的接地线中)、配电系统的各分支线路及需要重点监视的负载线路处,组成二级或三级剩余电流保护系统。剩余电流监视器检测到剩余电流超过预定值时,可在本地发出报警信号,同时通过输出触点或通信系统将报警状态或数据传送到控制室的电气火灾监控设备,由电气火灾监控设备集中监视、显示、记录和存储各监控点的报警状态及有关数据,并由值班人员及时处理。

4.1.3 接地故障保护

接地故障是带电导体和大地、接地的金属外壳或与地有联系的构件之间的接触。例如,架空导线断裂接地,电源线绝缘损坏碰金属外壳等。如接地故障不及时排除,有人碰到落地的带电导线或金属外壳,或接地故障电流持续存在,有可能发生触电伤亡和设备事故,或发生电气火灾事故。

接地故障保护过去经常采用过电流保护电器(例如熔断器或断路器等)进行保护,当接地故障电流大于过电流保护电器动作电流整定值时,由过电流保护电器切断电路。在TT系统中,对额定电流较大的线路,并且配电线路较长时,发生接地故障的故障电流有可能小于保护电器的动作整定电流,这时过电流保护电器就不会动作。这种情况下,应采用剩余电流动作保护电器(或带接地故障保护的断路器)进行接地故障保护。

在TN系统中,发生带电导线落地的接地故障或不完整的金属性接地故障或电弧性接地故障时,情况与TT系统相似。TN系统即使发生金属性对保护导线(PE线)短路,在线路较长和额定电流较大时,过电流保护电器也有可能不动作。此时也只有采用剩余电流动作保护电器,或带接地故障保护的断路器才能可靠地进行接地故障保护。

剩余电流动作保护电器仅用于接地故障保护时,根据配电网系统的形式和容量大小,额定剩余动作电流可以从几百毫安至几十安培甚至几百安培。考虑选择性保护,分断时间一般应采用延时型。

剩余电流动作保护电器用于接地故障保护又要考虑间接接触保护时,动作特性应按间接接触保护的要求选择。

4.2 剩余电流动作保护电器的分级保护方式

低压供用电系统中为了缩小发生人身电击事故和接地故障切断电源时引起的停电范围,剩余电流动作保护电器应采用分级保护。分级保护方式的选择应根据用电负荷和线路具体情况的需要,一般可分为两级或三级保护。各级剩余电流动作保护电器的动作电流值与动作时间应协调配合,实现具有动作选择性的分级保护。

4.2.1 分级保护应以末端保护为基础

剩余电流动作保护电器的主要功能是间接接触和直接接触的电击保护,而绝大部分的电击事故都是发生在末端用电设备上,因此剩余电流动作保护电器的分级保护应以末端保护为基础。住宅和末端用电设备必须安装剩余电流动作保护电器。末端保护和上一级保护的保护区应根据负荷分布的具体情况确定其保护区。

GB 13955 规定末端必须安装剩余电流动作保护电器的设备和场所如下:

- (1) 属于Ⅰ类的移动式电气设备及手持式电动工具。
- (2) 生产用的电气设备。

- (3) 施工工地的电气机械设备。
- (4) 安装在户外的电气装置。
- (5) 临时用电的电气设备。
- (6) 机关、学校、宾馆、饭店、企事业单位和住宅等除壁挂式空调电源插座外的其他电源插座或插座回路。
- (7) 游泳池、喷水池、浴池的电气设备。
- (8) 安装在水中的供电线路和设备。
- (9) 医院中可能直接接触人体的电气医用设备。
- (10) 其他需要安装剩余电流保护装置的场所。

4.2.2 企事业单位、公共场所、住宅等建筑物电气线路的分级保护

企事业单位、住宅等建筑物内部采用分级保护。采用分级保护时,必须在总电源端、分支线首端或线路末端安装剩余电流动作保护电器。电源端的第一级剩余电流动作保护电器应满足防接地故障引起电气火灾和间接接触电击保护的要求,线路末端的剩余电流动作保护电器应满足直接接触保护的要求。如图 2.9-31 所示为 GB 13955—2005 推荐的城镇电网分级保护的模

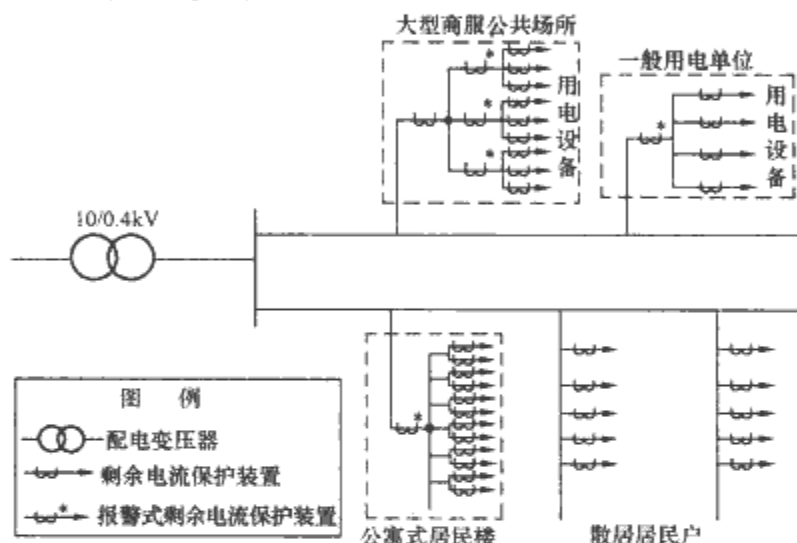


图 2.9-31 城镇电网分级保护的模

式。负荷类型相对比较复杂的城镇配电网,在用电单位内采用分级保护时,还应考虑采用防电气火灾的剩余电流动作保护电器。

居民住宅楼的总电源进线断路器的剩余电流动作保护功能,主要是作为接地故障保护和电气火灾保护。在每套住宅的配电线路,或插座回路中应安装剩余电流动作保护电器,作为直接接触电击保护。有关的住宅建筑设计标准中也对电源插座回路设置剩余电流动作保护电器作出了明确的规定。在总电源线和每户配电线路均设置有剩余电流动作保护电器时,应考虑剩余电流动作保护电器之间动作特性的匹配。

如图 2.9-32 所示为剩余电流动作保护电器(图中用RCD表示)在住宅建筑物电气线路中的应用。每幢住宅(例如单幢别墅)的总电源保护采用S型剩余电流动作保护电器(延时0.06s),对额定电流较大的总保护(包括多个住宅用户的单元,如一幢公寓楼或高层住宅的几个楼面等)应采用延时0.3s或0.5s的剩余电流断路器或剩余电流监视器,每户的保护电器采用一般型(无延时)剩余电流断路器。总保护和每套住宅配电线路采用的剩余电流动作保护电器的规格和动作特性见表2.9-14,保护电器之间在动作电流和分断时间上协调配合,达到选择性保护的要求。一般情况下,当末端电气设备发生故障或有人触电时,只有该户的剩余电流动作保护电器切断电路排除故障,而总电源断路器不动作,保持整幢住宅正常供电。当总电源与进户线之间的线

路发生故障或进户线后的剩余电流动作保护电器损坏而不能排除故障时，才由总电源断路器在经过一定的延时后切断电路排除故障。

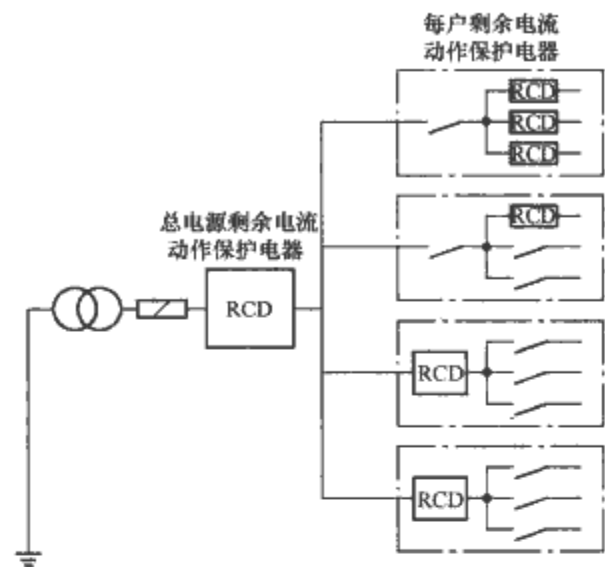


图 2.9-32 剩余电流动作保护电器在住宅建筑物电气线路中的应用

每套住宅的剩余电流动作保护电器，可根据需要安装在进户线的总开关处，也可安装在带插座的分支线路上。对有些固定安装的家用电器，如洗碗机和贮存式电热水器等，发生直接接触的可能性较小，保护导线断裂的可能性也比较小，因此主要是考虑间接接触保护，而且这类用电设备的正常泄漏电流比较高，所以应安装 $I_{\Delta n}$ 为 0.3A 的剩余电流动作保护电器。对一些保护要求比较高的场合，如浴室、厨房等，可选用 10mA 的剩余电流动作保护电器。对有插座的回路，因为在插座回路中运行的电器一般是移动式电器设备，发生直接接触的危险性较大，必须要安装剩余电流动作保护电器，并选用动作电流为 30mA 的剩余电流动作保护电器。

表 2.9-14 图 2.9-32 中使用的剩余电流动作保护电器的规格和动作特性

总 保 护 (延时型)	进户配电线路或分支线路(瞬时动作)	
	规 格	备 注
$I_{\Delta n}=0.3A, 0.5A$ $I_N=63A, 160A,$ $200A, 400A, 630A,$ $800A$	$I_{\Delta n}=10mA$ $I_N=16A$	对特殊要求的场所,如潮湿、小孩可能触及的场所等
	$I_{\Delta n}=30mA$ $I_N=25A, 40A$ 或 $63A$	一般使用场合,如带插座的电气线路
	$I_{\Delta n}=0.3A$ $I_N=25A, 40A$ 或 $63A$	用于洗碗机、大容量热水器等泄漏电流较大的设备

对于用户数量较多的住宅，如高层建筑及大型商服公共场所和办公楼等，由于总电源进线的额定电流比较大，可以采用三级保护的模式。总电源线入户以后可分成若干路主干线供电，每个主干线负责几个层面的用户供电。总电源处设置一个剩余电流动作保护电器，每个主干线和每户配电线路再分别设置剩余电流动作保护电器。主干线和每户的剩余电流动作保护电器的配置可与图 2.9-31 所示相同。总电源线的漏电保护主要考虑电气火灾保护和主干线接地故障保护，额定剩余动作电流可选用 0.5A 及以上，可采用剩余电流切断电路的方式也可采用剩余电流报警装置。采用剩余电流切断方式时，可采用延时 0.5s、1s 或 2s 的延时型剩余电流断路器，或选用带接地故障保护的电子式断路器。采用剩余电流报警装置时，可采用剩余电流监视器或剩余电流继电器组成的报警装置。

4.2.3 农村电网电气线路的分级保护

GB 13955 推荐的农村电网的分级保护模式如图 2.9-33 所示。其中图 2.9-33 (a) 所示适用于农村电网中、小型配电变压器 (160kVA 以下) 供电的架空配电网，其主要负荷为农副业加工及居民生活用电，可设置电源为第一级保护的三级保护方式。图 2.9-33 (b) 所示分级保护模式适用于农村中型配电变压器 (160kVA 及以上) 供电的配电网，其主要负荷为农业机械、排灌、小型乡镇工业企业及居民生活用电，可在各条配电出线设置第一级保护的分级保护方式。

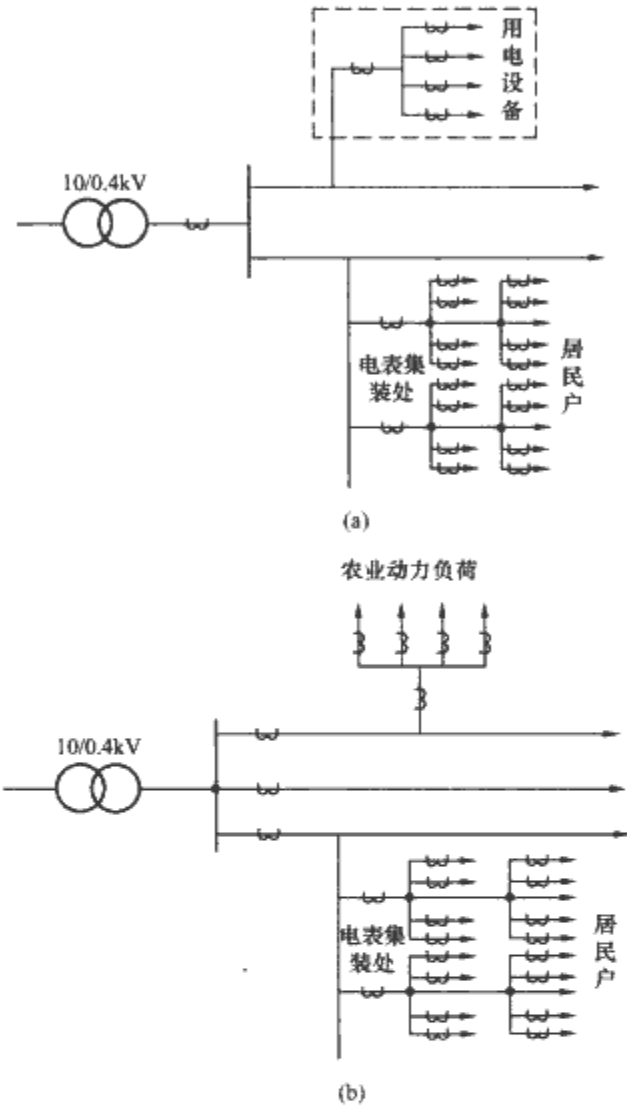


图 2.9-33 农村电网推荐的分级保护模式 (a) 模式一; (b) 模式二

第一级保护（电源总保护或各配电支线的保护）主要考虑架空线的接地故障保护，额定剩余动作电流可选用 0.5A 及以上，可采用剩余电流切断电路方式，或采用剩余电流报警装置。采用剩余电流切断方式时，可采用延时 0.5s 或 1s 的延时型剩余电流断路器。采用剩余电流报警时，可采用剩余电流监视器或剩余电流继电器组成报警装置。第二级保护主要作为分支线或农村集中安装电表箱、农业生产设备的电源配电箱后面线路的电气火灾保护和接地故障保护。为了避免大面积停电，宜采用延时型剩余电流断路器，额定剩余动作电流选用 0.1A 或 0.3A，延时时间 0.2~0.3s。末端保护，如果是居民住宅，主要考虑间接接触电击保护和直接接触电击保护，应选用动作电流为 0.03A 及以下的一般型剩余电流断路器。如果是保护固定安装的农业机械，如排灌站、农业加工厂的电气设备等，主要是考虑间接接触保护，应根据设备容量大小、泄漏电流大小及设备台数等，选用额定剩余动作电流 0.1A、0.3A 的一般型或延时型的剩余电流断路器。对于移动使用的农业电气设备，因为与人体接触的机会较多，要同时考虑直接接触和间接接触电击保护，应选用 0.03A 及以下的一般型剩余电流断路器。

5 剩余电流动作保护电器的选用和安装

5.1 剩余电流动作保护电器的选用

剩余电流动作保护电器的选择要考虑使用的电网、安装场所、保护的對象、气候条件和自然条件等因素，合理地选择剩余电流动作保护电器的额定参数和动作特性。

5.1.1 按电网情况及电源条件选择

剩余电流保护电器的极数和额定电压应与供电系统的相数和额定电压相匹配。供电电网的电压高于额定电压会因绝缘、触头承载能力、电子线路等原因使剩余电流动作保护电器损坏。供电电网的电压低于装置额定电压时，电磁式剩余电流动作保护电器仍可正常运行，而电子式剩余电流动作保护电器会因电子线路的工作电压降低而影响动作特性。供电系统除了保护导线以外的所有导线（包括中性线）都应通过剩余电流动作保护电器，否则会造成误动作或拒动作的情况。因此应按下列要求选用额定电压和极数。

单相 220V 供电的电气设备应选用额定电压为 220V（或 230V）的单极二线或二极剩余电流动作保护电器，优先选用二极式剩余电流动作保护电器。

三相三线式 380V 电源供电的电气设备，应选用额定电压为 380V（或 400V）的三极剩余电流动作保护电器。

三相四线式 380V 电源供电的电气设备，三相设备与单相设备共用的电路应选用 380V（或 400V）三极四线或四极剩余电流动作保护电器。

在选择额定剩余动作电流时，除了考虑保护对象外，还要考虑电网正常的泄漏电流。对于配电线路保护用的剩余电流动作保护电器动作电流应大于线路中实测最大泄漏电流的 2 倍，对于分支线路用的剩余电流动作保护电器动作电流应大于实测最大泄漏电流的 2.5 倍。

由于泄漏电流随环境条件和线路额定电流在不断变化，测量和估算泄漏电流比较麻烦。为便于选用，可采用下列的经验公式估算额定剩余动作电流：

$I_{\Delta n} \geq I_N / 2000$ 适用于照明和居民单相用电回路。

$I_{\Delta n} \geq I_N / 1000$ 适用于三相三线制或三相四线制动力及照明和动力混合线路。

必要时可通过实际测量，获取被保护线路或设备的对地泄漏电流。因环境条件变化引起对地泄漏电流值变化较大时，应考虑采用动作电流可调式的剩余电流动作保护电器。

5.1.2 按不同的使用场所选择

选择剩余电流动作保护电器的动作特性时，应按电气设备不同的使用场所，合理地选取不同的动作电流。如果是潮湿的场所，例如工厂的电镀车间、清洗工场、建筑工地以及可能会受到雨水影响或充满水蒸气的地方，因为人体容易沾湿或出汗，人体电阻明显下降，危险程度比干燥场所大，适宜安装额定剩余动作电流为 0.03A 及以下、一般型的剩余电流动作保护电器。当用电设备的使用场所，人体大部分要浸没在水中，例如安装在游泳池、水景喷水池、水上游乐园、浴室等特定区域的电气设备，因为发生电击事故后，不仅有引起心室颤动的危险，而且还有溺死的危险，应选用额定剩余动作电流为 0.01A 的剩余电流动作保护电器。即使工作电压很低，例如 36V 时，也应安装动作电流为 0.01A 及以下的剩余电流动作保护电器。

对具有双重绝缘（或加强绝缘）的 380/220V 的电气设备，一般情况下，不需要安装剩余电流动作保护电器。但当这种用电设备使用在露天潮湿场所，并且带有一段经常移动

位置的电缆时，操作人员在使用这些用电设备时，往往难免接触这部分电缆。为了防止擦破电缆或用电设备受雨水、凝露影响而造成触电事故，应安装 0.03A 及以下的剩余电流动作保护电器。

操作人员在铁板、构架、基座等金属物体上工作或在锅炉、隧道和坑道中工作时，因为人体的大部分要和导电性物体相接触，容易发生触电事故。所以在这种条件下使用的手持式电动工具、照明灯等的供电回路，即使工作电压较低，当电压大于 24V 时，也应安装动作电流不大于 0.01A 的剩余电流动作保护电器。在这种情况下，剩余电流动作保护电器必须放置在外面并有专人监护。

表 2.9-15 所列为德国标准中按不同的使用场所选择剩余电流动作保护电器的要求，可供我们选用时参考。

表 2.9-15 德国标准中按不同的使用场所
选择剩余电流动作保护电器的要求

使用场所（或设备）	选用要求
灯具与照明设备	展览与表演场所的灯具应使用 $I_{\Delta n} \leq 0.03\text{ A}$ 的剩余电流断路器进行保护
装有盆浴或淋浴设备的房间	插座必须用 $I_{\Delta n} \leq 0.03\text{ A}$ 的剩余电流断路器进行保护
搭有顶棚的游泳池（室内游泳池）和露天游泳池	在保护区域范围内应使用 $I_{\Delta n} \leq 0.03\text{ A}$ 的剩余电流断路器
建筑工地	16A 及以下的插座应使用 $I_{\Delta n} \leq 0.03\text{ A}$ 的剩余电流断路器，其他可用 $I_{\Delta n} \leq 0.5\text{ A}$ 的剩余电流断路器
农用和园艺环境	防电气火灾选用 $I_{\Delta n} \leq 0.5\text{ A}$ 的剩余电流断路器，插座回路应使用 $I_{\Delta n} \leq 0.03\text{ A}$ 的剩余电流断路器
活动余地受限制的导电区域	$I_{\Delta n} \leq 0.03\text{ A}$ 的剩余电流断路器
在宿营地与野营车中的供电设备	插座必须使用 $I_{\Delta n} \leq 0.03\text{ A}$ 的剩余电流断路器进行保护
含有火灾危险的工作场所	应用 $I_{\Delta n} \leq 0.5\text{ A}$ 的剩余电流断路器防止电气火灾
野营车、游船、游艇及其在宿营地或停泊地的供电装置	装在宿营地和停泊地的插座必须使用 $I_{\Delta n} \leq 0.03\text{ A}$ 的剩余电流断路器
流动建筑、流动陈列车和流动卧车	$I_{\Delta n} \leq 0.03\text{ A}$ 的剩余电流断路器
具有实验桌的教室	$I_{\Delta n} \leq 0.03\text{ A}$ 的剩余电流断路器
备用供电设备与临时投入使用的其他供电设备	也要求优先选用剩余电流动作保护电器作为保护措施
潮湿、潮湿房间和户外供电设施	至 32A 的插座在连接户外工作的电气设备时必须应用 $I_{\Delta n} \leq 0.03\text{ A}$ 的剩余电流断路器
喷水池	在规定区域内使用剩余电流断路器
直接接触的补充保护	建议在住宅建筑中，对电流至 32A 的插座使用 $I_{\Delta n} \leq 0.03\text{ A}$ 的剩余电流断路器

5.1.3 自然条件、气候条件及环境对选择的影响

剩余电流动作保护电器的工作还与自然条件、气候条件等环境因素有关，因此应根据电气设备的工作环境条件选用剩余电流动作保护电器。按 GB 13955—2005 的规定，选用时应符合下列要求：

- (1) 剩余电流动作保护电器应与使用环境条件相适应。
- (2) 对电源电压偏差较大地区的电气设备应优先选用动作功能与线路电压无关的剩余电流动作保护电器。
- (3) 在高温或特低温环境中的电气设备应选用非电子型剩余电流动作保护电器。
- (4) 作为家用电器保护的剩余电流动作保护电器，必要时可选用具有过电压保护的剩余电流动作保护电器。
- (5) 安装在易燃、易爆、潮湿或有腐蚀性气体等恶劣环境中的剩余电流动作保护电器，应根据有关标准选用特殊防护条件的剩余电流动作保护电器，或采取相应的防护措施。

一般的剩余电流动作保护电器的外壳只适用于 IP20 的防护要求，即防止人的手指触及带电部件或运动部件，对水的侵入没有任何防护作用，并且只能在污染等级 2 或污染等级 3 的环境中使用。如果剩余电流动作保护电器要在更严酷的环境条件下使用，如在户外雨雪侵蚀、充满粉尘的车间或有喷水等持久性的导电性污染的场所使用的剩余电流装置需要采用特殊的结构，如采用 IP55 或 IP65 或更高等级的防护外壳。

当电源线通过架空线引入时，并且是在雷暴日较多的地区使用的剩余电流动作保护电器，应采用抗误脱扣能力较强的剩余电流动作保护电器，并采取特殊的保护措施，如采用电涌保护器（SPD）保护，防止雷击损坏剩余电流动作保护电器。

在易燃、易爆、潮湿或有腐蚀性气体等恶劣环境中使用的剩余电流动作保护电器应按防爆电器的要求采用防爆外壳，或按防腐蚀电器的要求采用防腐蚀的外壳进行保护。

5.1.4 按被保护负荷的性质选用

对于应用电子元器件较多的电气设备，电源装置故障含有脉动直流分量时，应选用 A 型剩余电流动作保护电器。

对负荷带有变频器、三相交流整流器、逆变器、UPS 装置及特殊医疗设备（例如：X 射线设备、CT）等产生平滑直流剩余电流的电气设备，应选用特殊的对脉动直流剩余电流和平滑直流剩余电流均能动作的 B 型剩余电流动作保护电器。

对弧焊变压器应采用专用的防触电保护电器。

对起动电流较大的电动机负荷，因起动时有较大的泄漏电流，为防止起动时误动作，应选用 S 型或短延时动作的剩余电流动作保护电器。

5.2 剩余电流动作保护电器的安装

5.2.1 安装应符合安装运行规程的要求

剩余电流动作保护电器安装应符合有关安装和运行的规程的要求，主要的安装规程如下：GB 13955、GB 16895.21、GB 14287.1—2005《电气火灾监控系统 第一部分：电气火灾监控设备》、GB 50096—1999《住宅设计规范》、GB 50054—1995《低压配电设计规范》、JGJ 46—2005《施工现场临时用电安全技术规范》、GB/T 3787—2006《手持式电动工具的管理、使用、检查和维修安全技术规程》等。

5.2.2 不同接地型式的配电系统中的接线方式

剩余电流动作保护电器在不同的系统接地型式时应正确接线。单相、三相三线、三相四线供电系统中的正确接线方式应符合 GB 13955—2005 规定的要求，见表 2.9-16。

表 2.9-16 剩余电流保护电器在不同的配电系统中接线方式

极数 接地型式	单相（单极或二极）	三 相	
		三线（三极）	四线（三极或四极）
TT			
TN			

续表

极数 接地型式	单相（单极或二极）	三 相	
		三线（三极）	四线（三极或四极）
TN TN-C-S			

注 1. L1、L2、L3 为相线；N 为中性线；PE 为保护线；PEN 为中性线和保护线合一；○、○分别为单相和三相电气设备；⊗为单相照明设备；**RCD**为剩余电流动作保护电器；⊕为不与系统中性接地点相连的单独接地装置，作保护接地用。

2. 单相负载或三相负载在不同的接地保护系统中的接线方式图中，左侧设备为未装有剩余电流动作保护电器，中间和右侧设备为装有剩余电流动作保护电器的接线图。

3. 在 TN-C 系统中使用剩余电流动作保护电器的电气设备，其外露可接近导体的保护线应接在单独接地装置上而形成局部 TT 系统，如 TN-C 系统接线方式图中的右侧设备带 * 的接线方式。

4. 表中 TN-S 及 TN-C-S 接地型式单相和三相负荷的接线图中的中间和右侧接线图，为根据现场情况可任选其一的接地方式。

5.2.3 安装要求

(1) 剩余电流动作保护电器安装前的检查。剩余电流动作保护电器安装前应检查额定电压、额定电流、额定剩余动作电流及分断时间等是否与所安装的线路相匹配。对于电子式剩余电流动作保护电器，有比较严格的工作电压范围。线路电压过高会损坏电子线路及影响产品的绝缘性能；电压过低可能影响电子线路的正常工作，导致产品不能脱扣。有些电压两用型的三极断路器（220~400V）可以在三相电路使用也可在单相电路中使用。如果在单相电路使用时，应按制造厂说明书的要求连接规定的两个极，否则可能因电子线路没有电源而不能正常工作。对于电磁式剩余电流动作保护电器，剩余电流保护功能与电压无关，因此在选用时只要考其绝缘性能，线路电压不能超过断路器的额定绝缘电压。当线路电压低于剩余断路器的额定绝缘电压时，断路器均能正常工作。多极断路器在单相电路中使用，可以连接断路器的任意两个极。

(2) 剩余电流动作保护电器的接线端标有电源和负载时的接线要求。一般剩余电流动作保护电器，尤其是电子式剩余电流动作保护电器，接线端上标有电源和负载标志，这时必须按标志要求进行接线，电源侧与电源进线连接，负载侧

连接用电设备，不能反接。如图 2.9-10 所示的电子式剩余电流断路器，当剩余电流互感器检测到故障电流后，使晶闸管导通，瞬时地接通脱扣线圈使断路器脱扣。断路器切断主电源后，把电子线路的供电电路断开，晶闸管关断并断开脱扣线圈的电流。如果进出线端反接，即使剩余电流断路器断开后，电子线路上仍有电压，晶闸管不能关断，脱扣线圈将持续流过电流而使线圈烧毁。

电磁式剩余电流动作保护电器的动作功能与电源电压无关，进出线反接对剩余电流脱扣器没有影响，但也可能影响断路器的其他性能，例如短路分断能力等。因此即使是电磁式剩余电流动作保护电器，当接线端有标志时也必须按规定的要求接线。如果接线端没有标志，则可以任意接线。

有的电子式剩余电流动作保护电器在电子线路的供电回路中增加了一个与主触头联锁的辅助触头，如图 2.9-34 所示。当断路器主触头断开时，辅助触头同时把电子线路的供电回路断开。这种型式的断路器无论电源从哪一侧进线都不会使脱扣线圈烧毁，因此只要经验证其他性能也不受进出线位置影响，接线端可以没有电源负载标志，这时也可任意接线。

(3) 接线端上标有相线和中性线时的接线要求。剩余电流动作保护电器如果必须区别相线端和中性线端时，中性线接线端子用“N”标志。这时，必须按标志规定的要求接线。

剩余电流动作保护电器的中性极有可以开闭的和不可开闭的两种。不可开闭中性极在分断时不能断开电路；可开闭的中性极一般不带过电流保护，且短路分断能力与相线极不一样。如果中性极和相线极接错，可能会产生下列故障：

1) 对于中性线不可开

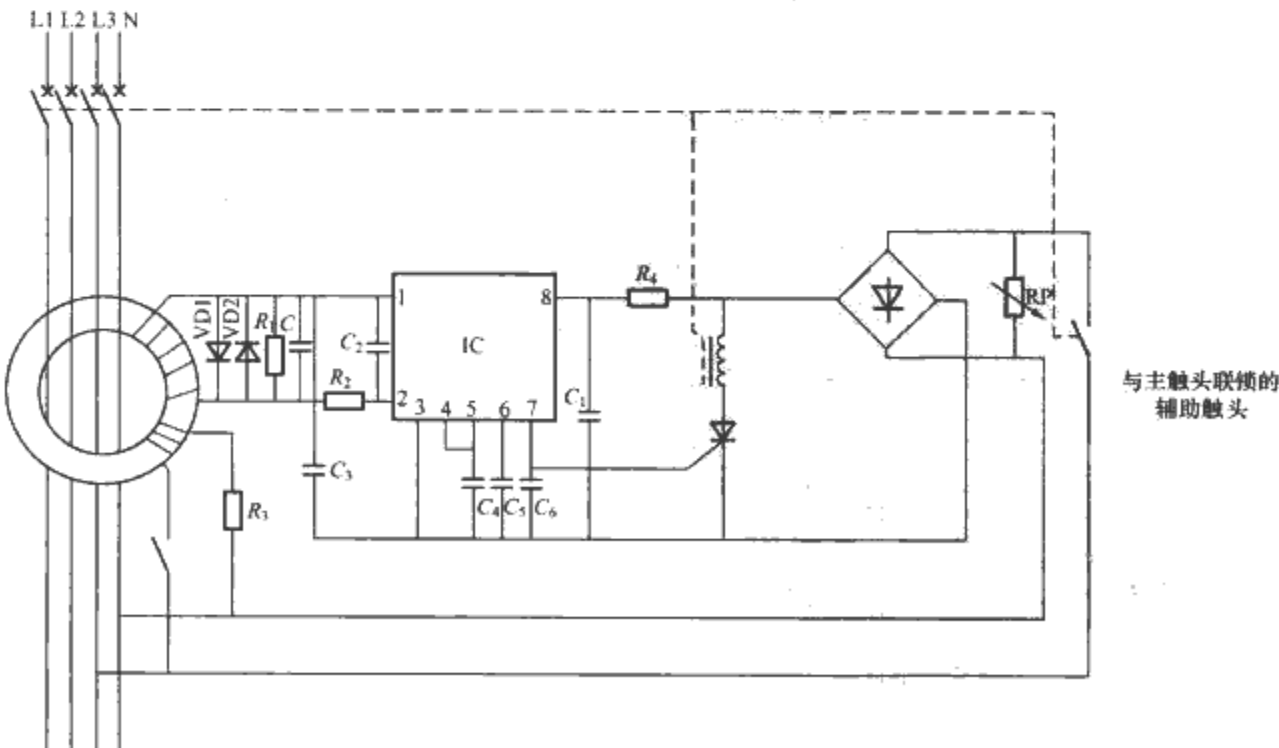


图 2.9-34 具有辅助开关的电子线路

闭的单极二线或三极四线剩余电流动作保护电器,因为中性线不能断开,如果把电源的一根相线错接到断路器的中性线端子上,则发生故障时即使断路器动作后也不能切断故障回路,可能造成人身伤害或设备事故。

2) 对于电子式三相四线剩余电流动作保护电器,电子线路的电源可取自相线和中性线,也可取自相线与相线。如果相线和中性线错接,可能造成电压过高烧毁电子线路或电压过低而不能正常工作。

3) 对于带过电流保护的剩余电流断路器,如果相线和中性线错接,当错接在中性极上的相线发生过电流或短路时,则断路器就不能脱扣排除故障,即使与其他极一起动作,也会因中性极的短路分断能力不够而使断路器损坏。

(4) 按制造厂规定的安装位置安装。对于剩余电流断路器,安装时在电弧喷出方向与其他物体(例如配电箱外壳,或其他电器装置等)的距离应大于制造厂规定的飞弧距离。剩余电流断路器在分断短路电流时电源侧的排气孔往往有电弧喷出,当排气孔前面有导电性材料时会通过导电材料引起短路事故,即使前面是绝缘材料也可能降低断路器的分断能力,影响短路分断性能。

制造厂一般要求剩余电流动作保护电器应垂直安装。如果操作手柄是“上下运动”,则安装位置时应是手柄向上运动使触头闭合。剩余电流动作保护电器应按制造厂规定的位置安装,否则会影响其短路分断能力或保护特性等。

(5) 剩余电流断路器的短路能力应与安装地点可能发生的短路电流匹配。剩余电流断路器安装在配电线路中,当线路发生短路故障时,应能承受或分断在安装地点可能发生的最大短路电流。短路电流大小与配电变压器的容量、线路截面积、安装地点与变压器之间的距离、短路阻抗的大小等因素有关。安装地点可能发生的短路电流可咨询供电部门或查阅有关的资料进行计算获得。

不带过电流保护的剩余电流动作保护电器本身没有分断短路电流的能力,所以在安装时必须在线路中串联安装一个短路保护电器。一般制造厂都会在其样本中给出匹配的短路保护电器(熔断器、断路器或其他装置等)的型号和规格。安装时一般应选用制造厂推荐的短路保护电器,这样可以确保在短路保护电器分断短路电流过程中短路电流不会损坏剩余电流动作保护电器。如果选用其他的短路保护电器,则短路保护电器在短路分断过程中所通过的能量(I^2t)和峰值电流(I_p)应小于剩余电流动作保护电器允许通过的 I^2t 和 I_p 值。

带过电流保护的剩余电流断路器本身具有分断短路电流的能力,因此在安装时不一定另外串联一个短路保护电器。但是当安装地点的预期短路电流大于断路器本身的短路分断能力时,也应串联一个后备的短路保护电器。后备短路保护电器与断路器组合后的短路能力应大于系统的预期短路电流。

(6) 剩余电流动作保护电器的安装应与环境条件相适应。家用剩余电流动作保护电器按污染等级2的环境条件设计,只能使用在住宅、办公楼、商场等条件较好的室内环境;专业人员使用的剩余电流动作保护电器是按污染等级3设计的,可使用在工厂、建筑工地、园艺、农场和农村等室内配电房等场合。剩余电流动作保护电器的外壳防护等级一般为IP20级,只能防止直径大于手指的固体异物侵入,而对粉尘、水汽、雨淋、喷水等均不能防护。一般剩余电流动作保护电器设计的使用环境温度为 $(-5\sim 40)^\circ\text{C}$ 。

因此,剩余电流动作保护电器如需在湿度较大、尘埃较

多或有腐蚀性气体的环境,或在高温或低温等较严酷的环境中使用,应采取必要的辅助措施进行防护。例如靠近炉火或受到阳光直射的配电板上的剩余电流动作保护电器,应加装隔热板或改变安装地点。在湿度大的或尘埃较多的地方使用时,应另外安装一个相应防护等级(防水、防尘、防腐蚀)的外壳,并适当地降容使用。

5.2.4 安装以后的检查

剩余电流动作保护电器安装好以后,在投入运行以前,应按有关电气设备安装规程的要求,检查绝缘电阻。对于电子式剩余电流动作保护电器,测量绝缘电阻的仪表的工作电压不要大于500V,因为GB 16916.1和GB 16917.1等标准只规定了剩余电流动作保护电器能承受600V的直流电压,电压过高就有可能损坏连接在接线端子间的电子线路。安装电磁式剩余电流动作保护电器后,对线路的绝缘电阻应没有影响。电子式剩余电流动作保护电器的电子线路会使电源线之间的绝缘电阻降低,但也不应小于几十千欧至几百千欧。

此外,在安装以后及投入使用以前还要操作试验按钮,检查剩余电流动作保护电器的动作功能。按GB 13955的要求至少应操作试验按钮试验三次,均能正常动作才能投入使用。在以后的使用过程中,也要定期操作试验按钮,例如每月操作一次,并且还要定期地对剩余电流动作保护电器按标准要求进行检验,以定期检查断路器的动作功能,保证正常运行。

5.3 剩余电流动作保护电器误动作原因分析

剩余电流动作保护电器因安装或使用不当往往会引起误动作或拒绝动作,而影响正常使用。常见的引起误动作的主要原因如下所述。

5.3.1 由于动作电流选用不当引起的误动作

在选择剩余电流动作保护电器的动作特性时,要考虑到电路和用电设备正常的泄漏电流。动作电流选择越小当然可以提供安全的保护,但是任何供电回路和用电设备都有一定的泄漏电流,当所选用的剩余电流动作保护电器的动作电流小于电路正常的泄漏电流时,剩余电流动作保护电器就不能投入正常运行。

根据实测,一般额定电流为25A的各种用电设备在正常情况下,泄漏电流在0.1~2mA左右。电动机在起动瞬间,泄漏电流为正常运行时的3倍左右。泄漏电流还与气候有关,南方地区用电量在5~8kW的家庭用户在潮湿的雨天泄漏电流可达到6mA左右。泄漏电流也可以按5.1.1所述的经验公式进行估算。

在选用额定剩余动作电流时,应大于线路中正常泄漏电流的2~4倍。

5.3.2 因接线错误引起的误动作

在三相四线制的线路中,在三相剩余电流动作保护电器后面的电路中连接单相负载引起的误动作。如图2.9-35(a)所示,把单相负载的工作零线接到了检测电流互感器的电源侧引起误动作。应改成图2.9-35(b)所示,使单相和三相负载分别由两个剩余电流动作保护电器供电,或采用2.9-35(c)的方法,用一个四极剩余电流动作保护电器供电。

5.3.3 由于重复接地引起的误动作

剩余电流动作保护电器后面的N线不能再重复接地,如重复接地可能产生误动作或拒动作。如2.9-36(a)所示,N线接到设备的外壳上并进行了重复接地,由于N线的工作电流经过接地分流而引起剩余电流动作保护电器误动作。或在设备绝缘损坏时接地故障电流通过N线分流至电源,

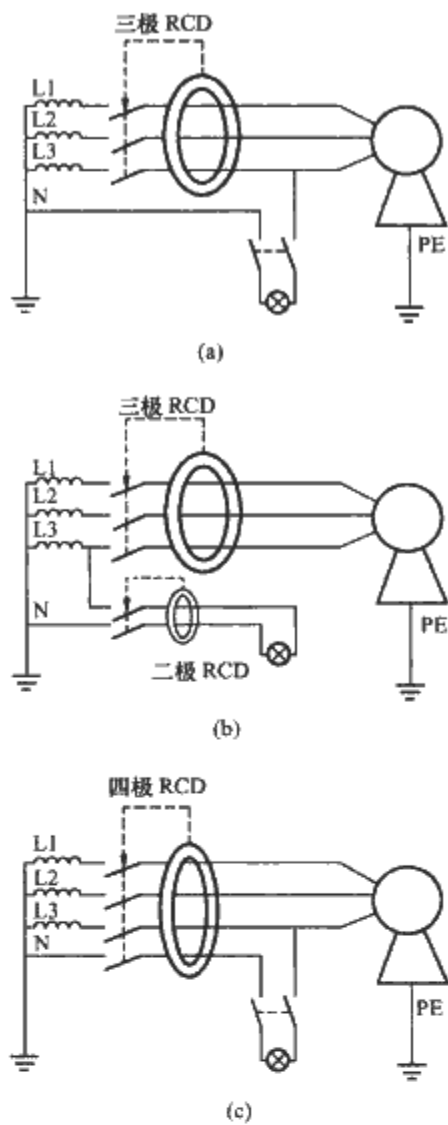


图 2.9-35 由于接线错误引起的误动作
(a) 接线错误；(b) 单相和三相负载
分别供电；(c) 用四极 RCD 供电

使剩余电流动作保护电器动作灵敏度降低。N 线重复接地多发生在老的配电线路改造的场合，因为老的配电线路常采用 N 线重复接地的方法来进行电击保护，安装剩余电流动作保护电器后如不把 N 线的重复接地拆除，则剩余电流动作保护电器就不能正常工作。正确的接法应如图 2.9-36 (b) 所示，将保护接地接到剩余电流动作保护电器前端的 N 线上。

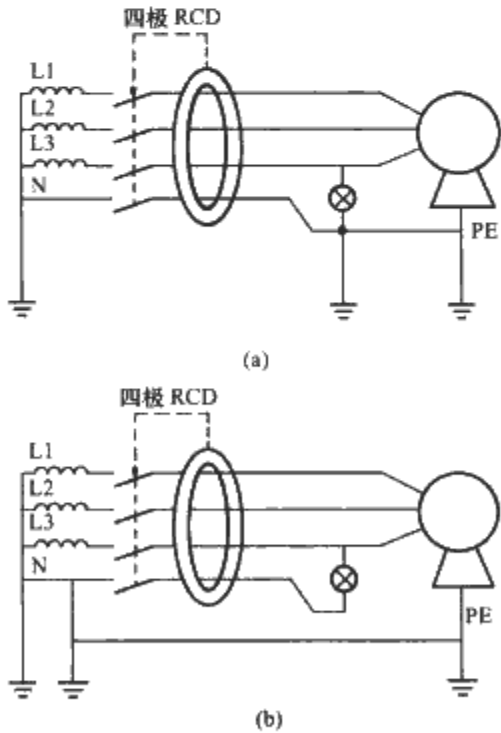


图 2.9-36 N 线接地不当引起的误动作
(a) N 重复接地接线错误；(b) 保护接地
应接至 RCD 前端 N 线

5.3.4 保护接地线连接不当影响剩余电流动作保护电器动作

在 TN 系统中，安装剩余电流动作保护电器电路的用电

设备的保护接地线不能通过剩余电流动作保护电器的电流互感器。如图 2.9-37 (a) 所示，用电设备的保护接地线通过电流互感器，用电设备外壳发生绝缘故障时，接地故障电流通过互感器回流至电源，因而互感器检测不到剩余电流，剩余电流动作保护电器就不会动作。应如 2.9-37 (b) 所示那样连接，保护接地线不经过互感器，直接连接到剩余电流动作保护电器的电源侧。

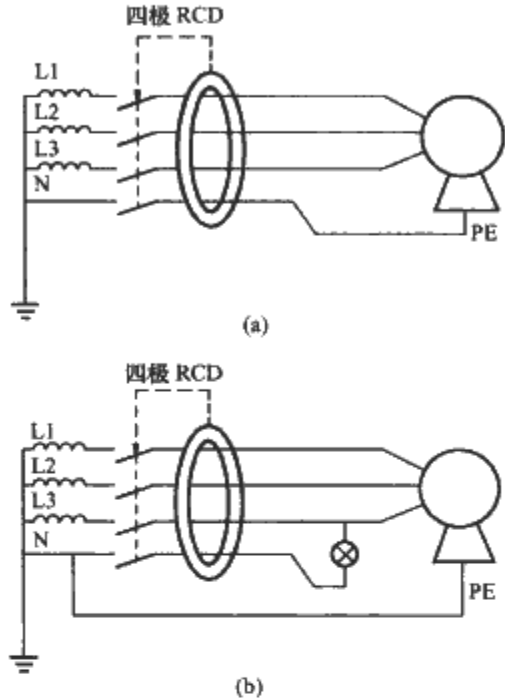


图 2.9-37 用电设备的接地保护不当引起误动作
(a) 保护接地接线错误；(b) 接线正确

5.3.5 由于过电压引起的误动作

架空线往往会因大气雷电感应产生过电压。剩余电流动作保护电器所控制的电路中，接有变压器、电磁接触器等感应负载时，在通断操作过程中也会产生操作过电压。当线路中产生过电压时，会通过的对地电容放电，或设备闪络产生放电电流使剩余电流动作保护电器误动作。如 2.9-38 所示那样通过对地静电电容充电，因为过电压频率很高，电容容抗很小，充电电流很大，往往造成剩余电流动作保护电器误动作。

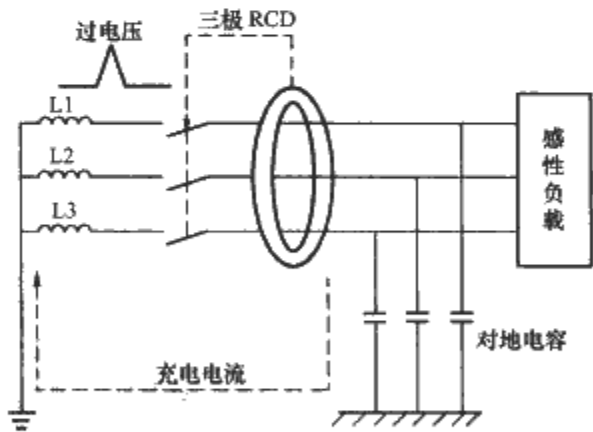


图 2.9-38 过电压通过对地电容充电

为防止过电压的影响，应选用具有较高耐误脱扣能力的剩余电流动作保护电器，如选用 S 型（或延时型）剩余电流动作保护电器，或在电路中接入过电压吸收装置等。

在配电线路中按过电压保护要求安装电涌保护器 (SPD) 时，如果将电涌保护器安装在剩余电流动作保护电器的负载侧，如图 2.9-39 (a) 所示，当电涌保护器遭受过电压泄放电流时，放电电流通过剩余电流动作保护电器，有可能引起误动作，此时应选用 S 型或延时型剩余电流动作保护电器，或按图 2.9-39 (b) 所示，将电涌保护器安装在剩余电流动作保护电器的电源侧。

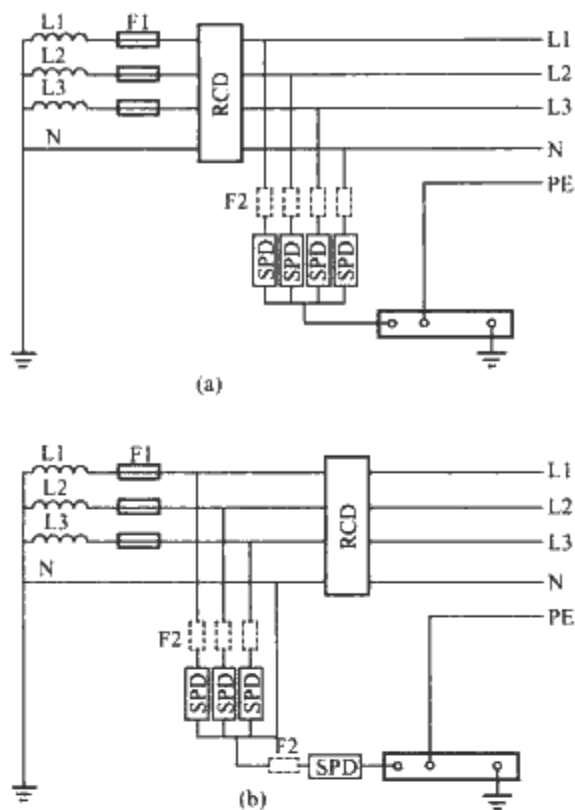


图 2.9-39 在装有 SPD 的配电线路中剩余电流动作保护电器的安装位置
(a) SPD 安装在剩余电流动作保护电器的负载侧;
(b) SPD 安装在剩余电流动作保护电器的电源侧
SPD—电涌保护器; RCD—剩余电流动作保护电器;
F1—电源进线端的过电流保护电器;
F2—电涌保护器的过电流保护电器

5.3.6 由于电磁感应的干扰产生的误动作

与剩余电流互感器邻近的导体中,突然有起动电流或大电流通过时,所产生的磁场会使剩余电流互感器受到影响产生误动作,剩余电流保护电器的安装位置,尤其是互感器的安装位置应尽可能与外部带电导体隔开得远一些。组装式剩余电流动作保护电器,当剩余电流互感器与控制部分分开安装时,若互感器与控制部分的连接导线过长,在强磁场或强电场作用下也会产生误动作。为避免这种现象产生,可将互感器二次回路的输出导线绞合在一起,并尽可能缩短长度,或使用屏蔽导线,屏蔽部分接地。在电磁干扰比较大的场合使用时,剩余电流动作保护电器应采取合适的防护措施,如采取特殊的防护外壳,在电源输入端安装浪涌吸收装置等,或采用 S 型或延时型剩余电流动作保护电器(但不能用于直接接触保护)。

5.4 剩余电流动作保护电器动作后的故障查找

当配电线路中的剩余电流动作保护电器发生脱扣后,要正确找出脱扣的原因,才能排除故障,确保线路正常运行。发生脱扣时,可先从剩余电流动作保护电器及线路的外部判断是否有明显的外部原因,如有人触电、明显的设备绝缘损坏或线路断线等引起脱扣动作。如无明显的外部原因,可按

如图 2.9-40 所示的流程图查找故障原因,确定是线路的原因还是剩余电流动作保护电器本身质量问题引起的脱扣,图中的 RCD 表示剩余电流动作保护电器。

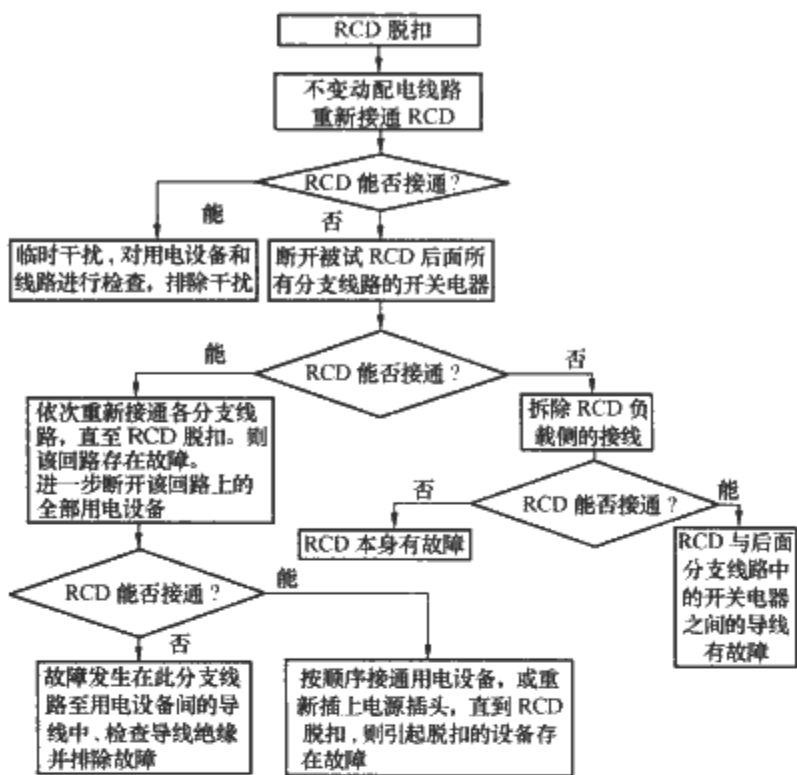


图 2.9-40 剩余电流动作保护电器脱扣以后查找故障的流程图

6 剩余电流动作保护电器的设计要点

剩余电流动作保护电器主要由剩余电流互感器、电子信号处理装置、剩余电流脱扣器及机械开关装置或报警装置等部分构成,因此剩余电流动作保护电器设计的重点是前面三个部件的设计。

6.1 剩余电流互感器设计要点

如 2.1.1 所述,剩余电流互感器采用电磁感应原理,检测被保护电路中的剩余电流,要求其具有高的检测灵敏度、高的检测可靠性和稳定性,在设计时要注意以下几点。

6.1.1 互感器铁心材料选用

剩余电流互感器一次回路的励磁电流很小,处于弱磁场条件下工作。对于额定剩余动作电流为 0.006A 的剩余电流动作保护电器,最小的工作磁场强度只有 0.080 A/m 左右。在正常工作时经常会受到大起动电流或短路电流的冲击,不能因冲击电流产生的剩磁影响动作特性。因此互感器的铁心材料一般采用具有高起始磁导率、高的最大磁导率和低矫顽力的铁镍软磁合金材料,例如 1J76、1J79、1J80、1J85 等。铁镍软磁合金材料具有极高的起始磁导率和最大磁导率,极低的矫顽力,较低的饱和磁感应密度,以及良好的温度稳定性。高起始磁导率的铁镍软磁合金的主要化学成分见表 2.9-17,直流磁特性见表 2.9-18。

表 2.9-17 高起始磁导率铁镍软磁合金的主要化学成分

合金 牌号	主 要 化 学 成 分										%
	C	P	S	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe	
1J76	≤0.03	≤0.02	≤0.02	0.30~0.60	0.15~0.30	75.0~76.5	1.80~2.20	—	4.80~5.20	余	
1J77	≤0.03	≤0.02	≤0.02	0.30~0.60	0.15~0.30	75.0~78.0	—	3.90~4.50	4.80~6.00	余	
1J79	≤0.03	≤0.02	≤0.02	0.60~1.10	0.30~0.50	78.5~80.0	—	3.80~4.10	≤0.2	余	
1J80	≤0.03	≤0.02	≤0.02	0.60~1.10	1.10~1.50	79.0~81.5	2.60~3.00	—	≤0.3	余	
1J85	≤0.03	≤0.02	≤0.02	0.30~0.60	0.15~0.30	79.0~81.0	—	4.80~5.20	≤0.2	余	
1J86	≤0.03	≤0.02	≤0.02	≤1.00	≤0.30	80.5~81.5	—	5.80~6.20	—	余	

注 表中数值为质量分数。

的铁镍软磁合金，截面积可设计为 10~20mm² 之间；额定电流较大时，互感器直径较大，平均磁路也长，铁心截面积应适当增大，可设计为 30~50mm² 之间。对于电磁式剩余电流动作保护电器，要求互感器有较高的灵敏度和较高的输出功率，因此要增大铁心的截面积，例如额定电流为 40~63A 的剩余电流动作保护电器，如采用高磁导率的铁镍软磁合金，铁心的截面积约在 100~200mm² 之间。对于 A 型剩余电流动作保护电器，要提高脉动电流时的输出，除了采取其他相应措施外（例如，改变磁滞回线形状，增加脉动直流时输出），也可增大互感器铁心截面积的尺寸。具体铁心尺寸应根据剩余电流动作保护电器的整体结构、一次回路的导体尺寸及检测灵敏度的要求综合考虑。

(2) 高磁导率的铁镍软合金材料的铁心在卷绕或加工完成后，要经过高温热处理后才能达到磁性要求。经过高温热处理的铁心对机械应力很敏感，在受到机械应力或冲击后，磁性能会急剧下降，使动作特性发生变化，因此在互感器设计时应采取足够的保护措施，防止正常使用过程中受机械应力的影响。互感器铁心应放置在高强度工程塑料制成的外壳中，并采取适当的防振措施，如增加防振垫片或充填防振硅脂等。在剩余电流动作保护电器结构设计时，也要防止一次回路导体或其他部件对互感器施加过大应力。

6.1.3 互感器二次回路阻抗与励磁阻抗匹配

在互感器几何尺寸和一次回路匝数确定的条件下，要达到最大的灵敏度，还应使二次回路阻抗与互感器的励磁阻抗匹配，这点对电磁式剩余电流动作保护电器尤其重要。

一般情况下，二次回路的电阻较小，当二次回路的电阻相对于阻抗可以忽略不计时，2.1.1 中式 (2.9-7) 可简化为

$$I_1 = \frac{E_2}{N_1} \left(\frac{N_1^2}{Z_0 N_2} + \frac{N_2}{Z_2} \right) \quad (2.9-11)$$

要提高灵敏度，即对应于一定的二次回路电压输出 E_2 ， I_1 越小越好，由式 (2.9-11) 可见，二次回路圈数 N_2 变化时，对应一定 E_2 值时， I_1 越小，则式 (2.9-11) 括号内的值应越小。当 N_2 变化时，括号内的值的变化如图 2.9-41 所示。双曲线 $\frac{N_1^2}{Z_0 N_2}$ 与直线 $\frac{N_2}{Z_2}$ 相交于 M 点，该交点的 $\frac{N_1^2}{Z_0 N_2} + \frac{N_2}{Z_2}$ 值最小。M 点的 $\frac{N_1^2}{Z_0 N_2} = \frac{N_2}{Z_2}$ ，即 $Z_2 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 Z_0$ 时，互感

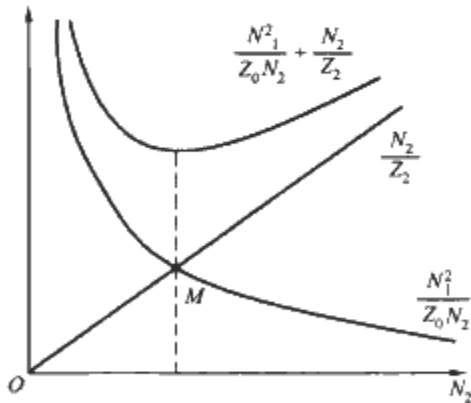


图 2.9-41 互感器的阻抗匹配

器的灵敏度最高。

对电子式剩余电流动作保护电器，二次回路的信号经过电子放大装置放大，灵敏度不是主要矛盾，因而不必考虑阻抗的匹配问题（见 6.3.1）。

6.1.4 剩余电流互感器工作点选择

剩余电流互感器在设计时还应考虑工作点在软磁合金材料磁化曲线上的位置，工作点应位于磁化曲线上的直线段，例如如图 2.9-42 中 a 点至 b 点之间。如选择在磁化曲线的饱和段，例如 b 点和 c 点之间，则动作电流的波动范围要大大增加。在磁化曲线上磁感应密度 B 与剩余电流互感器的二次回路的输出电压相对应，磁场强度与一次回路的电流相对应。如对应一定的二次回路输出电压变化，磁感应密度 B 的变化范围为 0.2 T（例如如图 2.9-42 中 a 与 b 点，或 b 与 c 点之间 B 的变化）。对应于同样的 B 变化范围，工作点在直线段，磁场强度 H 的变化范围为 0.55A/m，而在饱和段，则 H 的变化范围为 2.35A/m，是直线段的 4.27 倍。也就是说，如果工作点设计不合理，剩余电流动作保护装置的动作电流波动范围要增加到 4.27 倍，动作电流极不稳定。

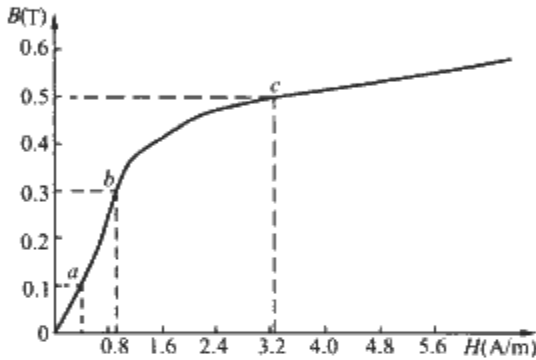


图 2.9-42 磁化曲线上工作点的选择

互感器在磁化曲线上的工作点的位置，与互感器的尺寸（尤其是铁心截面积）、材料、一次回路和二次回路匝数以及二次回路负载有关，在设计时要统筹考虑。

6.2 剩余电流脱扣器的设计要点

一般的电子式剩余电流动作保护电器，其剩余电流脱扣器主要是采用螺管式电磁铁或拍合式电磁铁，结构较为简单，在设计上没有什么特殊要求。这里主要讲述电磁式剩余电流动作保护电器使用的释放式脱扣器的设计要点。释放式脱扣器的结构及工作原理如 2.2.1 所述，设计时要考虑以下几点。

6.2.1 释放式脱扣器导磁回路及其材料选择

释放式脱扣器的磁轭和衔铁的材料选择，除了考虑较高的磁导率外，还应有足够的饱和磁感应强度，以保证在磁钢的作用下有一定的吸力。此外脱扣器在加工及正常工作过程中均会受到一定的机械应力，材料的磁性能不能对机械应力太敏感。因此释放式脱扣器磁回路的材料一般选用对机械应力不太敏感的 1J50 铁镍软磁合金材料，其含镍量约为 50% 左右，饱和磁感应强度可达 1.5T，其直流磁性能见表 2.9-19。

表 2.9-19

1J50 铁镍软磁合金的直流磁性能

合金牌号	产品种类	级 别	厚度或直径 (mm)	1J50 在 0.4A/m 磁场强度中的 磁导率 $\mu_{0.4}$ (mH/m)	最大磁导率 μ_m (mH/m)	矫顽力（在饱和磁感应 强度下） H_c (A/m)	饱和磁感应强度 B_s (T)
1J50	带材	I	0.35~0.50	≥ 5.0	≥ 65	≤ 8.8	1.5
			0.51~1.00	≥ 5.0	≥ 50	≤ 10	
			1.10~2.50	≥ 3.8	44	≤ 12	
	棒材	—	10~100	≥ 3.1	≥ 31.3	≤ 14.4	1.5

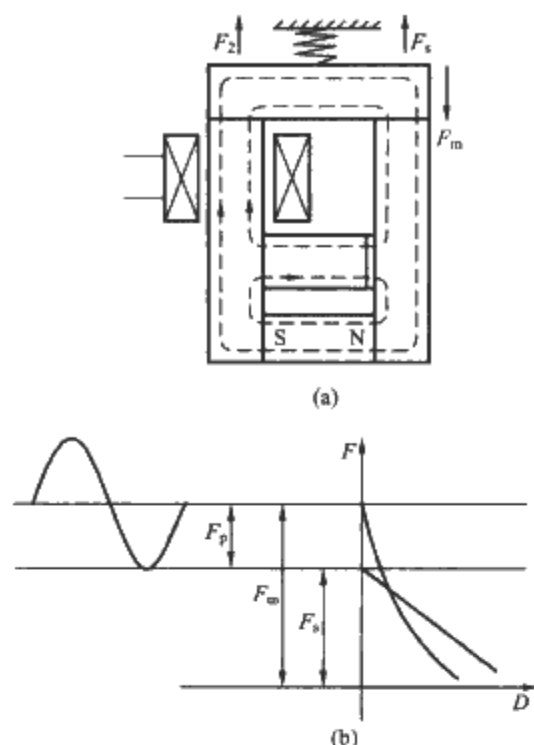


图 2.9-43 释放式脱扣器衔铁上各作用力之间的关系
(a) 示意图；(b) 关系图

(1) 释放弹簧的反力 F_s 与脱扣力有关，应使与衔铁相连的摆杆打击到脱扣杆上的静态力大于最大的脱扣力并有一定的余量。

(2) 磁钢吸力 F_m 不仅要克服释放弹簧的反力 F_s ，而且还要提供足够大的保持力 F_p ($F_m - F_s$) (见图 2.9-43)。剩余电流动作保护电器在通以 0.5 倍额定剩余动作电流时不能动作，此时的保持力 F_p 要使衔铁能保持在吸合面上，同时还要承受衔铁复位时的机械冲击力。因此，保持力 F_p 应大于 F_s 的 $1/3 \sim 1/2$ ， F_m 应为 F_s 的 $1.3 \sim 1.5$ 倍。

(3) 由图 2.9-43 可见，当消磁磁通产生的力 F_2 达到保持力 F_p 时，脱扣器的衔铁脱扣，因此 F_p 大小直接与脱扣器的脱扣功率有关，在设计时要与以上几个要求统筹考虑。

6.3 电子式剩余电流动作保护电器的设计要点

6.3.1 动作特性调节电路设计要点

电子式剩余电流动作保护电器可以通过改变采样电阻阻值和延时电路的电容来调整动作特性。如图 2.9-44 所示为常用的可调动作特性的电子线路，K1 为调节动作电流的拨动开关，K2 为调节动作时间的拨动开关。

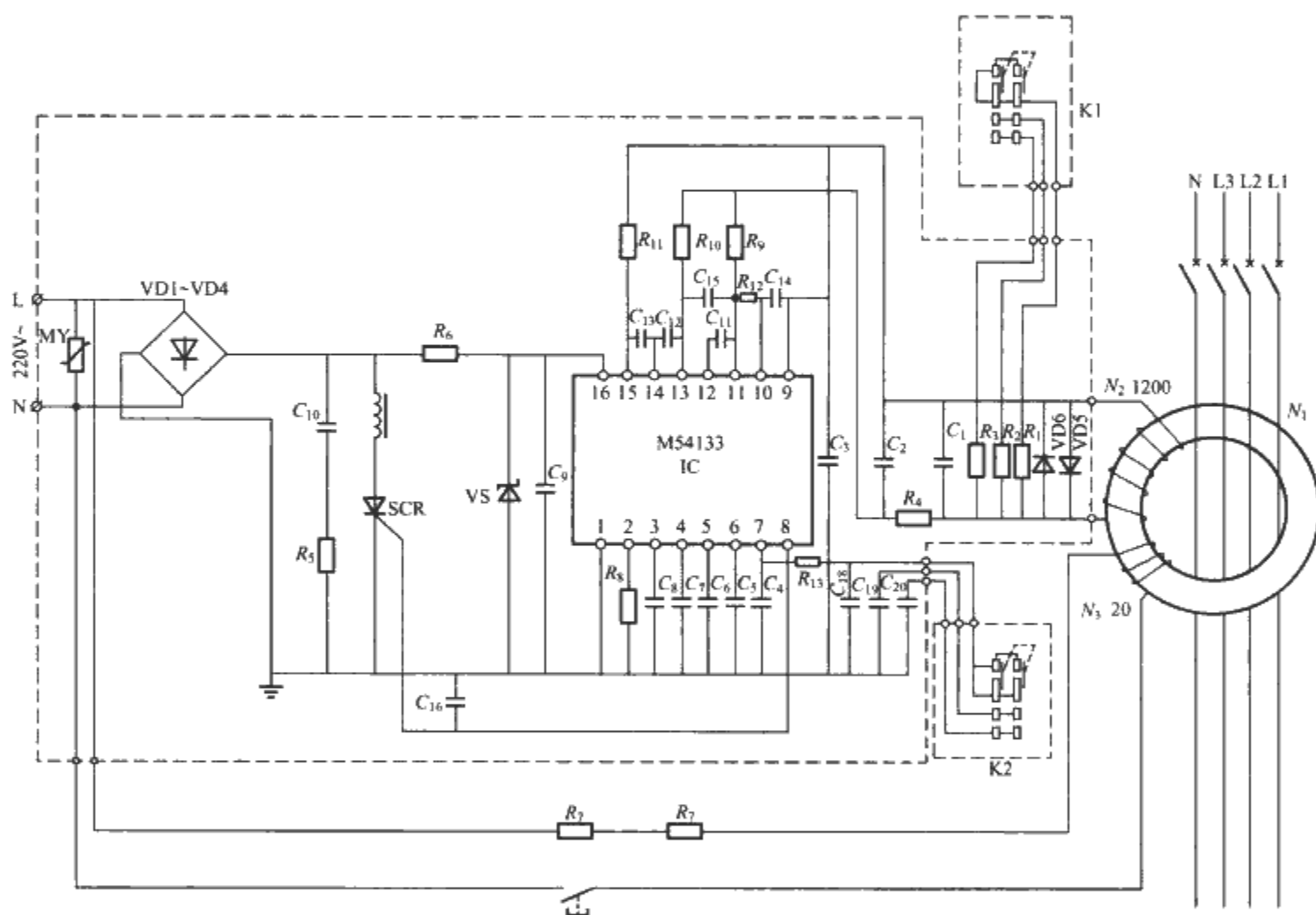


图 2.9-44 可调动作特性的电子线路原理图

(1) 额定剩余动作电流 $I_{\Delta n}$ 的调节。图 2.9-44 中集成电路输入端口 13 和 15 的采样电阻 R_1 、 R_2 和 R_3 ，以及开关 K1 组成时间调节电路。如果额定剩余动作电流 $I_{\Delta n}$ 的调节为 0.03A、0.10A 和 0.30A 三挡，则采样电阻值确定方法如下：

1) 确定集成电路输入端的门电压（触发电压），对于 M54133 为 15mV 左右。

2) 估算采样电阻上的电流 I_2 ，根据式 (2.9-5)，如忽略 I_0 (相对 I_1 和 I_2 ， I_0 较小)，则 $N_1 I_1 \approx N_2 I_2$ ，可得：
$$I_2 = \frac{N_1 I_1}{N_2}$$

3) $R I_2 = 0.015V$ ，即 $R = \frac{0.015 N_2}{N_1 I_1}$ 。例如， $N_1 = 1$ ，

$N_2 = 1200$ 时 $I_{\Delta n} = 0.03A$ ， $R = 600\Omega$ ； $I_{\Delta n} = 0.10A$ ， $R = 180\Omega$ ； $I_{\Delta n} = 0.30A$ ， $R = 60\Omega$ 。

所选用采样电阻大小与额定剩余动作电流及二次回路的匝数有关，动作电流越大，电阻值越小。但电阻值太小会影响电流调整的精度。因此当额定剩余动作电流较大时，应适当减少二次回路匝数 N_2 。一般来讲， $I_{\Delta n}$ 为 0.30A 及以下时，互感器二次回路匝数 N_2 可取 1000~1500 匝； $I_{\Delta n}$ 为 0.50A 及以上时，剩余电流动作保护电器的额定电流也较大，铁心截面积也较大， N_2 可取 500~800 匝；如果 $I_{\Delta n}$ 为 10A 及以上时， N_2 还应减少。

4) 采样电阻开路时，集成电路输入端口 13 和 15 没有输入，会导致装置不能动作。因此在设计时，调节开关不应

采用切换电阻的方式，而是采用并联电阻的方式来改变采样电阻阻值，确保采样电路不会因开关接触不好而开路。如图 2.9-44 所示，最高灵敏度的采样电阻 R_1 （例如，上述的 $I_{\Delta n}=0.03\text{A}$ ， $R=600\Omega$ ）是固定连接的，然后通过调节开关 K_1 关联 R_2 或 R_3 来改变采样电阻阻值，调节动作电流。即使调节开关 K_1 开路，剩余电流动作保护电器仍能以最高灵敏度的动作电流脱扣。

(2) 动作时间的调节。图 2.9-44 中集成电路端口 7 的电阻 R_{13} ，电容 C_4 、 C_{18} 、 C_{19} 、 C_{20} 和拨动开关 K_2 组成动作时间调节电路。M54133 是专门设计的具有内置延时电路的集成电路，通过调节端口 7 的电容值，可以调节延时时间。图中实例采用的 C_4 为 $0.01\mu\text{F}$ ， C_{18} 、 C_{19} 为 $0.68\mu\text{F}$ ， C_{20} 为 $33\mu\text{F}$ ， R_{13} 为 360Ω ，开关 K_2 在三个位置对应的延时时间 (s) 分别为：0.15，0.3，1.0。同样，对集成电路 M54133，端口 7 不能开路，因此调节开关也不能采用切换电容，而采用在 C_4 上增加并联电容的方式来改变电容值，防止开关故障造成装置失效。

如采用其他电子线路时，调节电路的设计要点基本与上述相同。

6.3.2 电磁兼容设计

电磁兼容设计对电子式剩余电流动作保护电器至关重要，是确保电子式剩余电流动作保护电器在其电磁环境中能正常工作，并且不对该环境中的任何事物构成不能承受的电磁骚扰的重要基础。剩余电流动作保护电器的产品标准要求其应能承受下列电磁兼容试验：

(1) 电快速瞬变/脉冲群抗扰度试验（共模）。4 或 2kV（对 SRCD 和 PRCD）。

(2) 浪涌抗扰度试验。4~5 kV（共模），4（差模）或 2kV（差模，对 SRCD 和 PRCD）。

(3) 射频电磁场辐射抗扰度试验。频率范围，80~1000MHz；试验电平，10V/m 或 3V/m（对家用剩余电流动作保护电器）。

(4) 射频电磁场感应的传导骚扰抗扰度试验。频率范围，0.15~80MHz；试验电平，10V 或 3V（对家用剩余电流动作保护电器）。

(5) 静电放电抗扰度试验。试验电平，接触放电 8 或 6kV（对家用剩余电流动作保护电器）。

(6) 射频发射验证。应符合 GB 4824—2001《工业、科学和医疗（ISM）射频设备电磁骚扰特性的测量方法和限值》中环境 A（主要与低压非公用电网或工业电网场所/建筑有关，它包括有较高的骚扰源）和环境 B（主要与低压公用电网有关，例如：民用、商用、轻工业场所/建筑和/或相应的使用环境，它不包括有较高骚扰源的情况，例如：弧焊机）规定的限值。

要达到上述要求，剩余电流动作保护电器在设计时必须进行电磁兼容设计。例如，采取相应的干扰抑制措施，印刷线路板的电磁兼容设计，合适的布线、屏蔽与接地，电源滤波和静电防护等方式来提高剩余电流动作保护电器的抗干扰能力，减少产品本身的发射。电磁兼容设计是一个比较复杂而且随机性较强的问题，需要有相当的经验积累。具体可参考有关电磁兼容设计的专著，对影响产品的干扰源、干扰传播途径及传播方式进行分析，并采取相应的措施及必要的试验验证，才能达到较好的设计效果。

7 剩余电流动作保护电器的发展方向

随着电子技术、微电子技术、直流电流检测等新技术的

发展，近几年来剩余电流动作保护电器的技术也取得了较大的发展。如 B 型剩余电流动作保护电器的功能逐步完善，体积进一步缩小；具有自检功能的剩余电流断路器使可靠性进一步提高。

7.1 B 型剩余电流动作保护电器的发展

符合现行标准的 AC 型和 A 型剩余电流动作保护电器在大部分应用场合能满足使用要求，随着新电子技术设备的应用（如频率变换器、X 射线发生器或 UPS 系统等），出现一些新的剩余电流，例如平滑直流剩余电流、二相或三相桥式整流产生的剩余电流、频率至 1000 Hz 的交流剩余电流等，现有的产品对这些剩余电流不能正常工作。

(1) 家用 B 型剩余电流断路器。SIEMENS 公司在 20 世纪 90 年代后期首先推出了 5SM B 型家用剩余电流断路器，即所谓全电流敏感型剩余电流动作断路器，可以在产生平滑直流电流的设备中进行有效的接地故障保护，其额定工作电压 415V，额定电流 63A，额定剩余动作电流为 30mA 和 300mA，4 极，宽度为 144mm。如图 2.9-45 所示为 SIEMENS 公司的 5SM B 型剩余电流断路器外形及工作原理图。

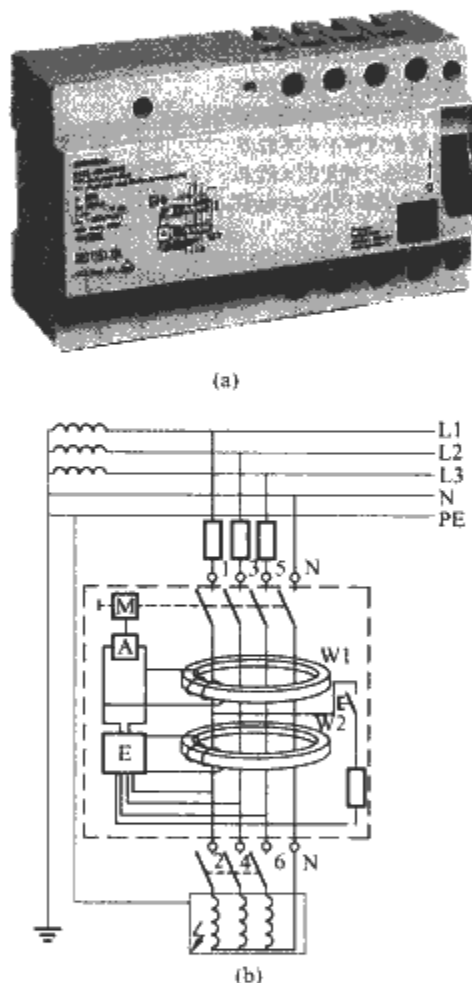


图 2.9-45 5SM B 型剩余电流断路器
外形及工作原理图
(a) 外形图；(b) 工作原理图

由于一般的电流互感器只能检测交流电流，不能检测平滑直流，因此 B 型剩余电流动作保护电器在 A 型剩余电流动作保护电器的基础上，增加了一个能检测平滑直流剩余电流的装置 [图 2.9-45 (b) 中的 W2]，例如采用受控电感的工作原理来检测平滑直流剩余电流，使剩余电流断路器能响应平滑直流电流。

B 型剩余电流断路器由于增加了一个直流剩余电流检测装置，体积较一般的剩余电流断路器大。5SM B 型剩余电流断路器宽度是一般剩余电流断路器的两倍。近几年在直流故障电流检测技术上有了较大的突破，检测装置体积缩小，使剩余电流断路器体积大大缩小。例如 MOELLER 公司新

开发的 B 型家用剩余电流断路器, 4 极, 宽度为 90mm, 仅为 5SM B 型的 60%。小体积 B 型剩余电流断路器的出现, 进一步完善了 B 型剩余电流动作保护性能, 为今后进一步广泛应用打下了基础。

(2) B 型配电装置用剩余电流断路。配电装置用剩余电流断路器的发展趋势是由塑壳断路器和剩余电流模块派生而成。剩余电流模块除了 AC 型和 A 型以外, 近几年也开发了能检测平滑直流电流的 B 型剩余电流模块, 如 ABB 公司的 RC223 剩余电流模块, 默勒公司的 RCD 模块, 可与塑壳断路器拼装成 B 型剩余断路器。如图 2.9-46 所示是 ABB 公司的 B 型 RCD 模块 RC223, 用于与 Tmax T4 组装成 B 型剩余电流断路器, 如图 2.9-47 所示是默勒公司的 NZM2 与 B 型 RCD 模块组装而成的 B 型剩余电流断路器。带 B 型剩余电流保护的塑壳断路器能在交流故障电流 (包括直至 1000Hz 的高频交流故障电流)、脉动直流故障电流和平滑直流故障电流的条件下正确动作。ABB 公司的 B 型剩余电流断路器还可针对各种不同频率的交流故障电流设定灵敏度, 共分 400Hz, 700Hz, 1000Hz 三个等级, 以适应不同使用场合频率的需要, 例如汽车工业 (1000Hz)、纺织工业设备 (700Hz) 以及机场和三相电流传动装置 (400Hz) 等。ABB 公司的 B 型剩余电流断路器的所有功能还可以通过精确设置

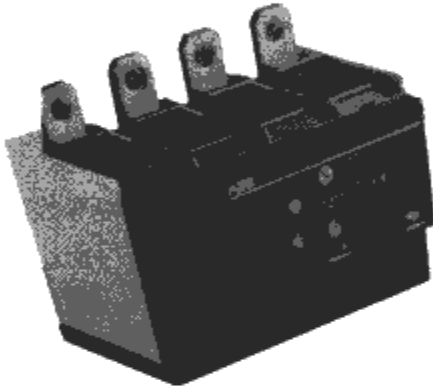


图 2.9-46 ABB 公司的 B 型 RCD 模块 RC223

表 2.9-22 平滑直流剩余电流和整流电路产生的直流剩余电流的分断时间和不驱动时间

型号	I_N (A)	$I_{\Delta n}$ (A)	剩余电流 (I_{Δ}) 等于下列值时的分断时间和不驱动时间标准值 (s)				
			$2I_{\Delta n}$	$4I_{\Delta n}$	$10I_{\Delta n}$	5A, 10A, 20A, 50A, 100A, 200A	
一般型	任何值	任何值	0.3	0.15	0.04	0.04	最大分断时间
S 型	≥ 25	> 0.030	0.5	0.2	0.15	0.15	最大分断时间
			0.13	0.06	0.05	0.04	最小不驱动时间

注 对于 B 型 RCBO, 超过过电流瞬时脱扣电流下限值电流范围的任何电流值不进行试验

表 2.9-23 额定频率超过 50/60Hz 至 1000Hz 交流剩余电流的脱扣电流标准值

频率 (Hz)	剩余不动作电流	剩余动作电流
150	$0.5 I_{\Delta n}$	$2.4 I_{\Delta n}$
400	$0.5 I_{\Delta n}$	$6 I_{\Delta n}$
1000	$I_{\Delta n}$	$14 I_{\Delta n}$

4) 额定频率的交流剩余电流叠加一个 $0.4I_{\Delta n}$ 或 10mA (两者取较大值) 的平滑直流电流, B 型剩余电流断路器应在交流剩余电流小于或等于 $I_{\Delta n}$ 时脱扣。

5) 脉动直流剩余电流叠加一个 $0.4I_{\Delta n}$ 或 10mA (两者取较大值) 的平滑直流电流, B 型剩余电流断路器应在脉动直流剩余电流小于 $1.4I_{\Delta n}$ (对于 $I_{\Delta n} > 0.01A$ 的 RCD) 或 $2I_{\Delta n}$ (对于 $I_{\Delta n} \leq 0.01A$ 的 RCD) 时脱扣。

的自诊断功能来进行检验。

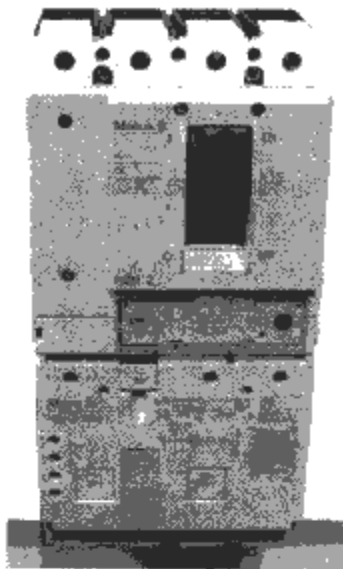


图 2.9-47 默勒公司的 NZM2 B 型剩余电流断路器


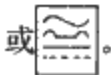
(3) B 型剩余电流断路器标准的发展。随着 B 型剩余电流断路器的发展, 国际电工委员会制订了 IEC 62423—2007《家用和类似用途的带和不带过电流保护的 B 型剩余电流动作断路器》, 以便规范市场上的 B 型剩余电流断路器。IEC 62423 对 B 型剩余电流断路器提出了下列要求:

- 1) B 型剩余电流断路器应在下列条件下确保脱扣: 频率至 1000Hz 的交流正弦剩余电流; 脉动直流剩余电流; 交流剩余电流叠加平滑直流剩余电流; 脉动直流剩余电流叠加平滑直流剩余电流; 二相或多相整流电路产生的脉动直流剩余电流; 平滑直流剩余电流。
- 2) 由平滑直流剩余电流和整流电路产生的直流剩余电流的分断时间和不驱动时间见表 2.9-22。
- 3) 额定频率超过 50/60Hz 至 1000Hz 交流剩余电流的脱扣电流标准值见表 2.9-23。

6) B 型剩余电流断路器对稳定增加的二相桥式整流电路产生的剩余电流, 应在 $0.5I_{\Delta n} \sim 2I_{\Delta n}$ 范围内脱扣。在突然施加表 2.9-22 所列的每个剩余电流时, 动作时间应符合表 2.9-22 的规定。

7) B 型剩余电流断路器对稳定增加的三相桥式整流电路产生的剩余电流, 应在 $0.5I_{\Delta n} \sim 2I_{\Delta n}$ 范围内脱扣。在突然施加表 2.9-22 所列的每个剩余电流时, 动作时间应符合表 2.9-22 的规定。

8) B 型剩余电流断路器对稳定增加的平滑剩余电流, 应在 $0.5I_{\Delta n} \sim 2I_{\Delta n}$ 范围内脱扣。在突然施加表 2.9-22 所列的每个剩余电流 (A) (除了 5, 10, 20, 50, 100 和 200) 时, 动作时间应符合表 2.9-22 的规定。

9) 对 B 型剩余电流断路器推荐的标志符号为  或 。

B 型剩余电流断路器标准的制订,将进一步规范 B 型剩余电流断路器的发展,有利于更好地推广 B 型剩余电流断路器的应用。

7.2 剩余电流动作保护电器的功能扩展

7.2.1 带自检功能的剩余电流断路器

如图 2.9-48 所示是德国 SHUPA 公司前几年开发的带自检功能的剩余电流断路器,是剩余电流断路器发展的又一亮点。为了保证剩余电流断路器的可靠运行,传统的剩余电流断路器在正常运行时要求定期操作剩余电流断路器的试验按钮,对其进行检查,以确认其剩余电流功能是否正常,这样操作受人为主观因素影响较大。而具有自检功能的剩余电流断路器可以自动定期检测剩余电流,当有故障时可以发出报警信号,通知人们进行检修。这一技术的应用将极大地提高剩余电流断路器使用的安全性和可靠性。

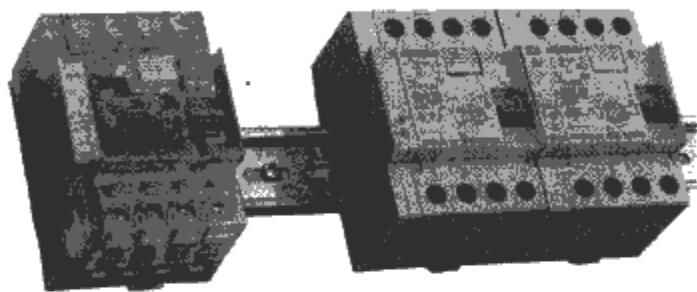


图 2.9-48 德国 SHUPA 公司的带自检功能的剩余电流断路器

7.2.2 具有短延时的剩余电流断路器

剩余电流动作保护电器在接通某些电气负载时会短时出现很大的瞬态泄漏电流(例如,连接在相线与保护接地间的吸收电容器),或当剩余电流动作保护电器后面的 SPD 在过电压作用下放电产生浪涌电流时,剩余电流动作保护电器往往会产生误动作。为了减少误动作,SIEMENS、ABB、F&G 等公司开发了具有 10ms 短延时特性的剩余电流断路器。其脱扣特性除仍符合 GB 16916.1/IEC 61008-1 中一般型的特性要求(即最大分断时间符合: $I_{\Delta n}$ 时小于等于 0.3s, $5I_{\Delta n}$ 时小于等于 0.04s)外,还能耐受波形为 8/20 μ s,峰值为 3000A 的冲击电流。由于有了短延时的特性和较高的冲击耐受电流,可防止接通泄漏电流较大的负载时,或 SPD 的放电电流引起剩余电流断路器误动作,或其他的过电压引起的误动作。SIEMENS 公司把具有这种特性的产品标志为 K 型,F&G 公司标志为 NFN Kv 型。

7.3 剩余电流动作保护电器的可靠性研究

剩余电流动作保护电器作为一种与人身和财产安全有关的保护电器,其可靠性尤为重要。多年来,国际电工委员会和世界各国一直在致力于研究剩余电流动作保护电器可靠性工作,通过标准的不断修订,使可靠性有了很大的提高。尤其是引入了模拟剩余电流动作保护电器老化的 28 天的环境试验,使可靠性得到了明显的改善。

剩余电流动作保护电器提供保护的可靠性,除了与产品本身的设计、制造、标准有关外,还与安装和使用环境条件等诸多因素有关。为了更好地指导用户使用剩余电流动作保护电器,提高产品使用的可靠性,国际电工委员会第 23E 技术委员会正在起草一个有关剩余电流动作保护电器使用可靠性的文件:IEC/TR 62350—2006《正确使用 RCD 的指南》。该指南的目的是指导设计人员、制造者、用户和安装维护人员在产品设计、标准的符合性、安装、安装后的试验

和检查、使用环境等方面如何保证剩余电流动作保护电器获得高的可靠性。在该文件中特别强调要求用户在使用周期中要定期操作试验按钮和定期检查。对于新安装的剩余电流动作保护电器,安装以后操作试验按钮不仅是检查断路器本身的功能,而且也能检查安装和接线是否正确。在正常使用过程中定期操作试验按钮,除了检测剩余电流动作保护电器的脱扣功能外,还可以提高其可靠性。剩余电流动作保护电器在正常情况下是不操作的,甚至几年也不会去操作,在这种情况下由于空气中的水汽、灰尘、油污或其他腐蚀性的物质会在操作机构、脱扣器极面等机械结构上堆积,使这些部件产生锈蚀、粘结甚至产生卡死现象,定期操作和检查相当于定期“激活”和“修复”的作用,从而大大延长剩余电流动作保护电器有效的寿命周期。

8 电弧故障断路器

8.1 发展概况

随着经济的飞速发展和人民生活水平的提高,用电量也在不断增加,用电安全,包括人身安全和防止漏电或电弧故障引起的火灾日益受到人们重视。目前,剩余电流动作保护断路器已广泛采用,但是剩余电流断路器在一些场合不能保护故障电弧,因而在美国发展了一种电弧故障断路器,用于家用的这种断路器已在市场上出售,称为 AFCI (Arc-Fault Circuit Interrupter),用于航空、汽车和工业领域的这种断路器也在开发中。

电弧故障常由于一束导线中某几根导线绝缘损伤,或导电回路接头处脱开而引起,它的电流可能小于线路的额定电流,所以检测故障电弧必须要把它和正常工作电弧(比如电焊)的信号和其他类似信号进行区别,必须做到在清除故障电弧同时不影响线路实际的工作。检测电弧故障需要采用特殊的电子线路,是一种智能化电器,由于配电系统智能化的发展,故障电弧的检测及其保护电器的发展会变得广泛而价廉。当前电弧故障断路器的开发和应用受到国际上低压电器领域的普遍关注,2002 年在瑞士召开的 21 届国际电接触学术会议上,有多篇论文特别介绍了这种断路器,并把它作为当前低压电器的一个重要发展方向。

8.2 电弧故障的类型和特征

故障电弧一般可能有两种情况产生:一种是沿着绝缘体部分导电表面;另一种产生于非常接近的两个电极。前者由于绝缘体长期受热或发生偶然性电火花,造成绝缘表面碳化,而形成电弧通道;后者是导电体碰上接地的管道,或是一束导体中部分被尖锐的金属体把绝缘割伤。在低压供配电线路中有三类电弧故障,它们分别是串联、线对线、线对地(见图 2.9-49)。

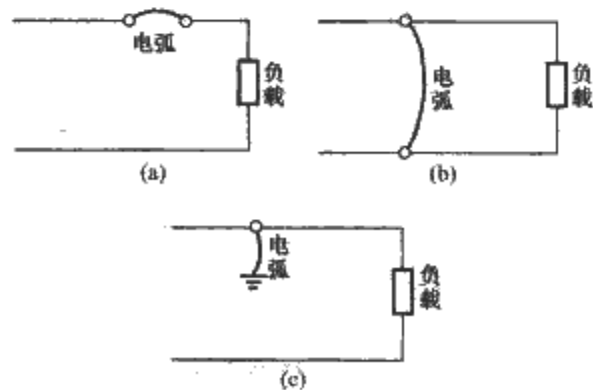


图 2.9-49 电弧故障类型
(a) 串联; (b) 线对线; (c) 线对地

串联故障一般产生于一根导体 [见图 2.9-49 (a)], 例如一束导体中有一根发生机械断裂, 或在导体接头处松开, 或在插头处有一个极断开。串联故障的电流受到负载的限制, 因而电流可能小于负载电流。线对线故障 [见图 2.9-49 (b)] 是一种短路, 例如把一束导体中两根导体绝缘表面机械损伤而相碰, 这种电弧电流决定于线路阻抗的大小。线对地故障 [见图 2.9-49 (c)] 发生于有接地回路的情况下。

检测电弧故障要从民用建筑中可能发生的电弧特性出发, 如图 2.9-50 所示为电阻负载串联电弧故障的电流与电压波形, 电流波形与电压波形同相, 并且在电流每次过零附近出现肩部平坦的波形, 这是由于每次过零时的点燃和熄弧过程引起的。电压波形除在电弧点燃和熄弧部分外近似矩形波, 对串联故障来说, 由于串联了电弧电压, 其电流有效值和 I^2t 都较线路额定电流还低, 所以不会引起过电流保护装置动作。如图 2.9-51 所示为线对线故障电弧电流和电压波形, 由于这种故障一般是间断发生的, 因而电弧电流和电压的波形也是间断产生的, 因而它的电流有效值和 I^2t 都要较直接短路情况要小, 在燃弧期间电流波形也出现肩部。

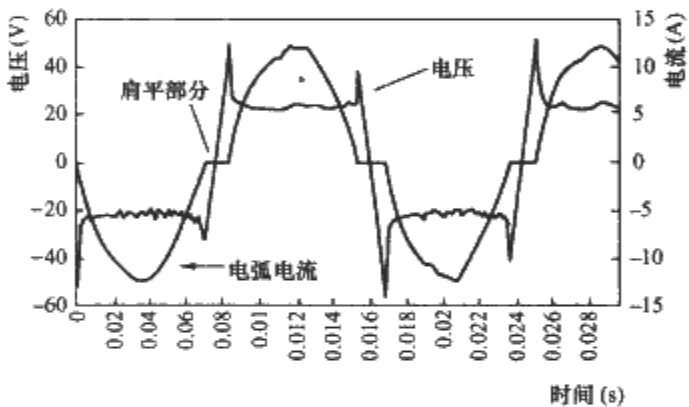


图 2.9-50 串联电弧故障的电流与电压波形

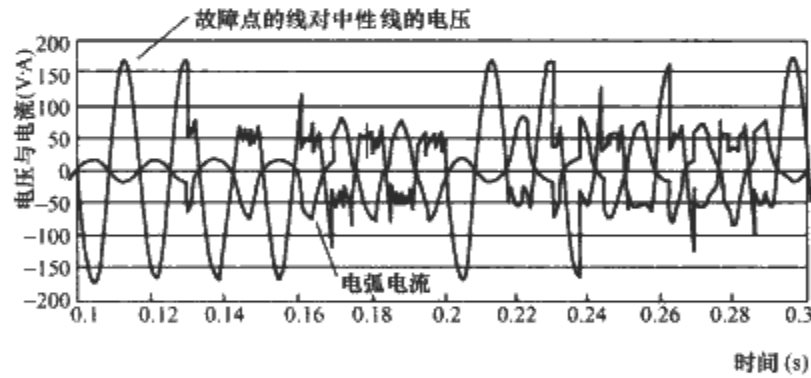


图 2.9-51 线对线故障电弧的电流与电压波形

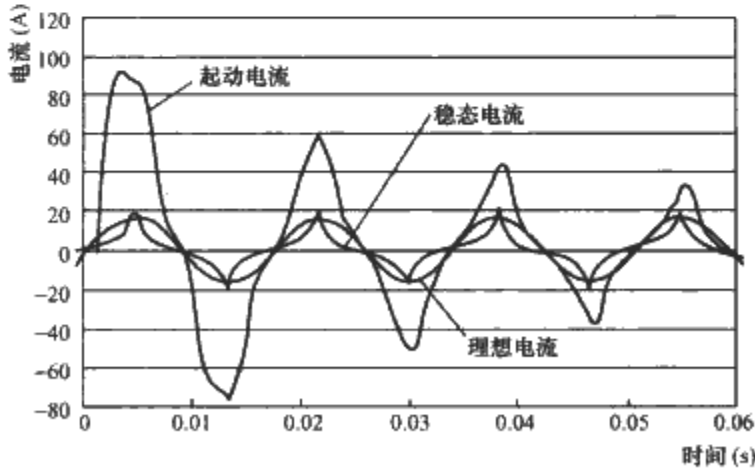


图 2.9-52 当负载为 4 台计算机时，从起动到稳态的电流波形

以上故障电弧波形十分类似于由开关电源供电的计算机负载波形, 如图 2.9-52 所示的带 4 台计算机的起动过程和稳态时电流波形, 波形上也呈现类似于故障电弧平坦的肩部, 因而检测故障电弧信号是一个艰巨的任务。

8.3 与过电流保护和剩余电流动作保护装置的比较

如上所述, 电弧故障产生的电流可能低于线路额定值, 或发生的过程是间断的, 因而采用过电流保护装置就可能检测不到这种故障。如图 2.9-53 所示为一个家用 20A 小型断路器的保护特性, 它能对家用线路起很好保护作用, 但电弧故障存在的区域在图中用打斜线的部分表示, 因而过电流保护对其不能起作用。

剩余电流动作保护装置能很好地对接地故障起保护作用, 但必须线路有接地才能起作用, 所以它对电弧故障引起的保护作用有一定的限制, 并且市场上出售的剩余电流保护插座只能对连接到插座的导线和设备起剩余电流保护作用。

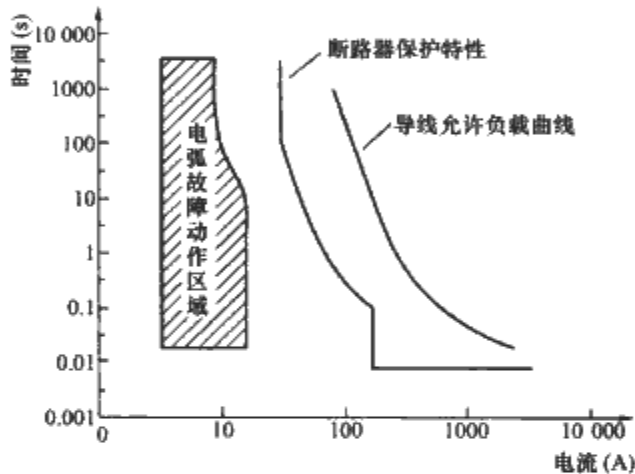


图 2.9-53 20A 小型断路器保护特性

8.4 发展前景

当前家用电弧故障断路器已出现在美国, 其规格为 120V, 额定电流 15A 和 20A, 航空和汽车领域用的类似保护装置也在开发中。在航空和航天器的电气网络中, 电缆束的电弧通道问题已存在 20~30 年, 它是由两种情况引起: 一种湿电弧通道是由于清洁剂渗入到电缆束内逐步破坏了电缆的绝缘; 另一种干电弧通道是由于电缆绝缘表面的机械损伤。由于现代航空电气设备中采用了大量的电子装置, 而这些电子装置存在的电流波形和故障电弧非常相似, 因而区别这些信号比家用电弧故障保护装置更为复杂。电弧故障保护装置向工业和商业用途发展, 负载的种类更是多样化, 例如电弧炉、电焊机等有各种使用特征, 因而以不同用途类别来开发电弧故障保护装置是可能选择的一种方案。

9 国内部分电气设备制造商生产的剩余电流动作保护电器及其主要技术参数

本节列举了国内部分电气设备制造商生产的剩余电流动作保护电器及其主要技术参数, 供选用时参考。表 2.9-24 所列为家用及类似用途的剩余电流断路器, 表 2.9-25 所列为配电装置用剩余电流断路器, 表 2.9-26 为剩余电流继电器和剩余电流监视器, 表 2.9-27 为移动式剩余电流动作保护电器。

续表

制造商	产品型号	极数	漏电脱扣形式	保护功能	额定电压 (V)	额定电流 (A)	额定剩余动作电流 (A)	分断时间 ^①
SIEMENS 股份公司	5SM3	2P, 4P	电磁式	漏电保护	125~230, 230~400	16~63	0.03~0.5	一般型 S 型
	5SU3	1P+N, 3P+N	电磁式	过载、短路、漏电保护	125~230, 230~400	6~40	0.03~0.3	一般型 S 型
	5SU9	1P+N	电磁式	过载、短路、漏电保护	230	6~63	0.03	一般型 S 型
	PRCBE... PRCBM...	1P+N	电磁式 电子式	过载、短路、漏电保护	230	6~40	0.03	一般型
	PRC...	2P, 4P	电磁式	漏电保护	230, 400	25~63	0.03~0.1	一般型
浙江正泰电器股份有限公司	NL1-63 NL1E-63	2P, 4P	电磁式 电子式	漏电保护	230, 400	25~63	0.03	一般型
	NL5E-32	2P	电子式	漏电保护	115, 230	10~32	0.01~0.03	一般型
	NB1LE-40 NB1LE-63	1P+N, 2P, 3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、漏电保护	230, 400	6~63	0.03	一般型
	NB1L-40 NB1L-63	1P+N, 2P, 3P, 3P+N, 4P	电磁式	过载、短路、漏电保护	230, 400	6~63	0.03~0.3	一般型
	NBH8LE-40	1P+N	电子式	过载、短路、漏电保护	230	1~40	0.03	一般型
	NB18L-63	1P+N	电子式	过载、短路、漏电保护	230	10~63	0.03~0.075	一般型
	DZ47LE-32 DZ47LE-63	1P+N, 2P, 3P, 3P+N	电子式	过载、短路、漏电、过电压保护	230, 400	6~63	0.03	一般型
	NL18-20 (G) NL18-32 (G)	2P	电子式	过电压、漏电保护	230	20 32	0.03	一般型
	DZL18-20	2P	电子式	漏电保护	220	10~20	0.03	一般型
	DZ12LE-60	1P+N, 2P, 3P, 3P+N	电子式	过载、短路、漏电保护	230, 400	6~60	0.03	一般型
	DZ267L (V) -32	1P+N	电子式	过载、短路、漏电、过电压保护	230	6~32	0.03	一般型
温州德隆电器有限公司	DLF362 DLF364	2P, 4P	电磁式	漏电保护	240, 415	6~63	0.03~0.3	一般型
惠州海格电气有限公司	U724E (G) U740E (G) U762E (G)	1P+N, 2P	电子式	过电压、漏电保护	230	25~63	0.03	一般型
	U7 (4) 24 P1 U7 (4) 40 P1 U7 (4) 62 P1 U7 (4) 80 P1	2P	电磁式	漏电保护	230, 400	25~80	0.03~0.3	一般型 S 型
	A060E (G) ~A063E (G)	1P+N	电子式	过载、短路、过电压、漏电保护	230	6~20	0.03	一般型
	A060M ~A065M	2P	电磁式	漏电保护	230	6~32	0.3	一般型 S 型
北京人民电器厂	GM63LE	2P	电子式	过载、短路、漏电保护	230	6~40	0.03	一般型
	GPNV	1P+N	电子式	过载、短路、漏电保护	230	6~32	0.03	一般型
广东珠江开关有限公司	DZ47LE	1P+N, 2P, 3P, 3P+N	电子式	过载、短路、漏电保护	220, 380	6~50	0.03	一般型
	ZKZ47L-63	1P+N, 2P, 3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、漏电保护	220, 380	6~63	0.03	一般型
上海第三开关厂	DZL199-32	2P	电子式	漏电保护	230	10~32	0.03	一般型
	DZL118-63	2P	电子式	过载、短路、漏电保护	230	10~63	0.03	一般型
	3KB2L-25 3KB1L-63	1P+N, 2P, 3P, 3P+N	电子式	过载、短路、漏电保护	220, 380	6~63	0.03	一般型
沈阳金钟宏特电器有限公司	FAZ-L, FAZ-E	1P+N, 2P, 3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、漏电保护	230	1~50	0.03	一般型
北京明日电器设备有限责任公司	BMN-32L BM-50L	1P+N, 2P, 3P+N	电子式	过载、短路、漏电保护	230 400	6~50	0.03	一般型
杭州漏电开关有限公司	HLKB47LE-32	3P	电子式	过载、短路、漏电保护	400	32	0.03	一般型
华通机电集团有限公司	DZ47LE	1P+N, 2P, 3P+N	电子式	过载、短路、漏电保护	220, 380	10~50	0.03	一般型

续表

制造商	产品型号	极数	漏电脱扣形式	保护功能	额定电压 (V)	额定电流 (A)	额定剩余动作电流 (A)	分断时间 ^①
上海良信电器有限公司	NDB1L-32 NDB1L-50	1P+N, 2P, 3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	220, 380	6~50	0.03	一般型
TCL 国际电工 (无锡) 有限公司	TIL3-32	1P+N	电磁式	过载、短路、 漏电保护	230	6~20	0.03~0.1	一般型
	TIB2L-32	1P+N	电子式	过载、短路、 漏电保护	220, 380	6~50	0.03	一般型
	TIB1L-63	1P+N, 2P, 3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	230, 400	6~63	0.03	一般型
长城电器集团有限公司	DZ47LE II -50	2P, 3P, 1P+N	电子式	过载、短路、 漏电保护	220, 400	6~50	0.03~0.05	一般型
	DZ30LE-32	1P+N	电子式	过载、短路、 漏电保护	220	10~20	0.03	一般型
上海新亚电子开关厂	XYM30L-32	1P+N	电子式	过载、短路、 漏电保护	230	10~20	0.03	一般型
	XYL18-32	2P	电子式	漏电保护	220	10~32	0.03	一般型
	DZ47LE-32	1P+N, 3P+N	电子式	过载、短路、 漏电保护	220, 380	32	0.03	一般型
	XA47L-63 XA10LE-63	1P+N, 2P 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	220, 380	6~63	0.03~0.3	一般型
长征电器八厂	CB45LE-63	1P+N	电子式	过载、短路、 漏电保护	240	6~63	0.03	一般型
	DZL43 (FIN)	4P	电磁式	漏电保护	415	25~63	0.03	一般型
	NFIN	2P	电磁式	漏电保护	240	25~40	0.03	一般型
厦门士林电机有限公司	XSM1L (BHV)	1P+N, 2P, 3P, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	230	6~63	0.03	一般型
上海立新电器厂	DZL18-20	2P	电子式	过载、过电压、漏电保护	220	10~20	0.01~0.03	一般型
	LXDB30LE-32	1P+N	电子式	过载、短路、漏电保护	230	6~32	0.03~0.05	一般型
	LXDAB62-40	3P	电子式	漏电保护	380	40	0.03~0.05	一般型
南京电力高等专科学校附属工厂	DZ47LE-40 DZ47LE-50	1P+N, 2P, 3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	230, 400	6~50	0.03~0.05	一般型
	DZL226-20	2P	电子式	漏电保护	220	20	0.03	一般型
	DZ47LE-40	1P+N, 2P, 3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	230, 400	6~40	0.03~0.3	一般型
天正集团有限公司	DZL18-20 DZL18-32	2P	电子式	漏电保护	220	20~32	0.03	一般型
	DZ47LE-32 DZ47LE-63 DZ47LE-100	1P+N, 2P, 3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	220, 380	2~100	0.03~0.1	一般型
	TGM65LE-63	1P+N, 2P, 3P, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	220, 400	1~63	0.03	一般型
许继电气股份有限公司	DZ131LE-32	1P+N	电子式	过载、短路、 漏电保护	230	2~32	0.03	一般型
厦门宏美电子有限公司	(XM) BL0	1P+N, 2P, 3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	230, 400	6~50	0.03	一般型
上海电器股份有限公司人民电器厂	RMC1L-50	1P+N, 2P, 3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	220	6~32	0.03	一般型
	RMC1BL-32	2P	电子式	过载、短路、漏电保护	220	6~25	0.03	一般型
上海精益电器厂有限公司	HB45L-32N HB45L-63	1P+N	电子式	过载、短路、漏电保护	220	6~32	0.03	一般型
	HB65LE	1P+N, 2P, 3P, 4P	电子式	过载、短路、漏电保护	230, 400	6~40	0.03	一般型
	HL1-20/1	2P	电子式	漏电保护	220	20	0.03	一般型
天水二一三机床电器厂	DZX2-32NL DZX2-40L DZX2-60L	1P+N, 2P, 3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	220	1~60	0.03~0.05	一般型
上海万松电气设备有限公司	RWM5L (DZ47LE) -32	1P+N, 2P, 3P, 3P+N	电子式	过载、短路、 漏电保护	230, 400	6~32	0.03	一般型

续表

制造商	产品型号	极数	漏电脱扣形式	保护功能	额定电压 (V)	额定电流 (A)	额定剩余动作电流 (A)	分断时间 ^①
长江电气股份有限公司	CKM6LE-32/1N	1P+N	电子式	过载、短路、漏电保护	220	6~32	0.03	一般型
上海电器科学研究所电器开关有限公司	SDX1-50L	1P+N	电子式	过载、短路、漏电保护	220	6~50	0.03~0.1	一般型
杭州之江开关有限公司	HSM8L-32 HSM8NL-32 HSM8L-63	1P+N, 2P, 3P, 4P	电子式	过载、短路、漏电保护	220, 380	6~63	0.03	一般型
天津市百利低压电器有限公司	TM31L-32	1P+N	电子式	过载、短路、漏电保护	230	6~32	0.03	一般型
浙江嘉控电气股份有限公司	JXM25LE-63	1P+N, 2P, 3P	电子式	过载、短路、漏电保护	230, 400	6~63	0.03	一般型
	FIN-40	2P, 4P	电磁式	漏电保护	220, 380	25~40	0.03~0.3	一般型
杭州临安乾龙电器有限公司	DZL227	2P, 3P	电子式	漏电保护	230	20~32	0.03	一般型
	QLM1L-63	2P	电子式	过载、短路、漏电保护	230	40~60	0.03	一般型

① 一般型在发生故障分断时没有故意延时，即瞬时动作；S 型在 $2I_{\Delta n}$ 时的极限不驱动时间为 0.06s。

表 2.9-25 配电装置用剩余电流断路器

制造商	产品型号	极数	漏电脱扣形式	保护功能	额定电压 (V)	额定电流 (A)	额定剩余动作电流 (A)	分断时间 ^①
精益电器集团有限公司	DZ15LE-40 DZ15LE-100	2P, 3P, 3P+N	电子式	过载、短路、漏电保护	220, 380	6~100	0.03~0.1	一般型
	JNM2L-160 JNM2L-250 JNM2L-400	3P+N	电子式	过载、短路、漏电保护	380	50~400	0.05~0.3	一般型 延时型
	DZ15LE-40 DZ15LE-63	2P, 3P, 4P	电子式	过载、短路、漏电保护	380	10~63	0.03~0.075	一般型
环宇集团有限公司	DZ20L-160 DZ20L-250 DZ20L-400 DZ20L-630	3P, 4P	电子式	过载、短路、漏电保护	400	50~630	0.05~0.3	一般型 延时型
	HUM8L-100 HUM8L-250 HUM8L-400	3P, 4P	电子式	过载、短路、漏电保护	400	16~400	0.03~0.5	一般型 延时型
	DZ15LE-40 DZ15LE-100	2P, 3P, 4P	电子式	过载、短路、漏电保护	220, 380	6~100	0.03~0.1	一般型
浙江德力西电器股份有限公司	DZL25-100 DZL25-200	3P+N	电子式	过载、短路、漏电保护	380	40~200	0.05~0.3	一般型
	DZ20L-160 DZ20L-250 DZ20L-400 DZ20L-630	3P+N, 4P	电子式	过载、短路、漏电保护	380	50~630	0.05~0.5	一般型 延时型
	CDM1L-100 CDM1L-225 CDM1 (7) L-400 CDM1 (7) L-800	3P, 4P	电子式	过载、短路、漏电保护	400	16~800	0.1~1	一般型 延时型
	DZ15LE-40 DZ15LE-63 DZ15LE-100	2P, 3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、漏电保护	230, 380	20~100	0.03~0.1	一般型
长城电器集团有限公司	DZ20L-160 DZ20L-250 DZ20L-400	4P	电子式	过载、短路、漏电保护	380	50~400	0.05~0.3	一般型
	DZ20L (ZKZ20L)	2P, 3P, 3P+N	电子式	过载、短路、漏电保护	220, 380	16~400	0.015~0.2	一般型 延时型
广东珠江开关有限公司	ZKZ1L [S (G) L]	3P, 4P	电子式	过载、短路、漏电保护	400	40~800	0.03~1.0	一般型 延时型
	ZKZ3L-160 ZKZ3L-400	3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、漏电保护	400	40~400	0.03~0.5	一般型 延时型
	FHM1L-150 FHM2L-125	1P, 2P, 3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、漏电保护	380	6~150	0.05~0.2	一般型

续表

制造商	产品型号	极数	漏电脱扣形式	保护功能	额定电压 (V)	额定电流 (A)	额定剩余动作电流 (A)	分断时间 ^①
上海第三开关厂	3KM1L-250 3KM1L-400	3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	400	100~400	0.05~0.5	一般型 延时型
	DZ15L-40 DZ15L-63	3P, 4P	电磁式	过载、短路、 漏电保护	380	6~63	0.03~0.1	一般型
人民电器集团有限公司	RDL20-160 RDL20-250 RDL20-400	3P+N	电子式	过载、短路、 漏电保护	380	80~400	0.1~0.2	一般型 延时型
杭州漏电开关有限公司	DZ15L-40 DZ15L-63 DZ15L-100	3P, 3P+N, 4P	电磁式	过载、短路、 漏电保护	380	40~100	0.03~0.1	一般型
	DZ20L-400	3P+N, 4P	电磁式	过载、短路、 漏电保护	400	200~400	0.1~0.2	一般型
杭州之江开关有限公司	DZ15L-40 DZ15L-100	3P+N	电磁式	过载、短路、 漏电保护	380	6~100	0.03~0.1	一般型
	HSL1 (SZL) -63 HSL1 (SZL) -100 HSL1 (SZL) -200 HSL1 (SZL) -400 HSL1 (SZL) -800	3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	400	10~800	0.03~1	一般型 延时型
	DZL466-200D	3P+N	电子式	过载、短路、 漏电保护	380	160~200	0.05~0.5	延时型
华通机电集团有限公司	DZ15LE-40 DZ15LE-100	3P, 3P+N	电子式	过载、短路、 漏电保护	380	40~100	0.05~0.075	一般型
广东奇正电气有限公司	DZ20LE-160 DZ20LE-250 DZ20LE-400	3P, 3P+N	电子式	过载、短路、 漏电保护	380	50~400	0.03~0.3	一般型
	FKM2L-160 FKM2L-400 FKM2L-630	3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	380	40~630	0.03~0.5	一般型 延时型
上海华通开关厂	SHTL1-160 SHTL1-250 SHTL1-400	3P, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	380	50~400	0.1	一般型 延时型
上海新亚电子开关厂	DZ15LE-40 DZ15LE-100	2P, 3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	220, 380	10~100	0.03~0.05	一般型
	DZ20L-160 DZ20L-250 DZ20L-400	4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	380	100~400	0.05~0.3	一般型 延时型
南京电力高等专科学校附属工厂	LJM1L-100M LJM1L-225M LJM1L-400L	3P, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	400	63~400	0.1~0.5	一般型 延时型
上海万松电气设备有限公司	DZ20L-160 DZ20L-250 DZ20L-400	3P, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	380	50~400	0.05~0.3	一般型 延时型
	DZ15LE	2P, 3P, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	380	6~40	0.05	一般型
	SAZ2-225	4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	380	100~225	0.03~0.3	一般型
天津市百利低压电器有限公司	DZ20L-160 DZ20L-250 DZ20L-400	3P, 3P+N	电子式	过载、短路、 漏电保护	380	50~400	0.05~0.3	一般型 延时型
	TM30L-100B TM30L-225B	4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	400	16~225	0.05~0.5	一般型 延时型
天正集团有限公司	DZ15LE-40 DZ15LE-100	2P, 3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	380	6~100	0.03~0.05	一般型
	DZ20L-160 DZ20L-250 DZ20L-400	3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	380	50~400	0.1	一般型 延时型

续表

制造商	产品型号	极数	漏电脱扣形式	保护功能	额定电压 (V)	额定电流 (A)	额定剩余动作电流 (A)	分断时间 ^①
浙江正泰电器股份有限公司	DZ15LE-40 DZ15LE-100	2P, 3P, 3P+N	电子式	过载、短路、 漏电保护	380	6~100	0.03~0.3	一般型
	DZL25-100 DZL25-200	3P+N	电子式	过载、短路、 漏电保护	380	40~200	0.03~0.3	一般型
	DZ20L-160 DZ20L-250 DZ20L-400 DZ20L-630	3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	380	50~630	0.05~0.5	一般型 延时型
	DZ158LE-100	1P+N, 2P, 3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	230、400	63~100	0.03~0.3	一般型
	NM1LE-100 NM1LE-225 NM1LE-400 NM1LE-630	2P, 3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	230、400	16~630	0.03~1	一般型 延时型
	NM8L-100S/H/R NM8L-250S/H/R NM8L-630S/H/R NM8SL-630S/H/R	3P, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	400	16~630	0.03~0.5	一般型 延时型
上海电器科学研究所电器开关有限公司	S (D) L-100 (J) S (D) L-200 (J) S (D) L-400 (J) S (D) L-800 (J)	3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	400	40~800	0.03~1	一般型 延时型
上海精益电器厂有限公司	DZ20L-160 DZ20L-250 DZ20L-400	3P+N	电子式	过载、短路、 漏电保护	380	50~400	0.05~0.3	一般型
	HM3-100R HM3-160R HM3-250R HM3-400R	4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	400	16~400	0.05~0.3	一般型 延时型
	HM3-100 (125) R HM3-160R HM3-250R HM3-400R	4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	400	16~400	0.03~1	一般型 延时型
	SG103C SG103CM	3P	电子式	过载、短路、 漏电保护	230、400	15~100	0.03~0.5	一般型
北京人民电器厂	GM8LE-100 GM8LE-225 GM8LE-400	3P, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	400	16~400	0.1~0.5	一般型 延时型
厦门士林电机有限公司	XSML3-100H XSML3-160S XSML3-250S XSML3-400S (H)	3P, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	230、400	15~400	0.03~0.5	一般型 延时型
长征电器一厂	MB30L-100 MB30L-200 MB30L-400 MB30L-800	3P, 3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	400	40~800	0.1~1	一般型 延时型
TCL 国际电工 (无锡) 有限公司	TIL1H (N, S) -125 TIL1H-160 TIL1H (N, S) -250	3P, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	400	10~250	0.03~3	一般型
	TIL2M (B, R) -400	3P, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	400	225~400	0.1~0.5	一般型
北京明日电器设备有限责任公司	SBL-100 SBL-200 SBL-400	3P+N, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	400	40~400	0.03~1	一般型 延时型
常熟开关制造有限公司	CM1L-100 CM1L-225 CM1L-400 CM1L-630	3P, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	400	10~630	0.03~1	一般型 延时型

续表

制造商	产品型号	极数	漏电脱扣形式	保护功能	额定电压 (V)	额定电流 (A)	额定剩余动作电流 (A)	分断时间 ^①
施耐德 (北京) 低压电器有限公司	Vigicompact NS100/160 NS (D) 100/160/250 NS400/630	3P, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	380、415	100~630	0.03~30	一般型 延时型
浙江嘉控电气股份有限公司	DZ15L-40 DZ15L-100	3P, 3P+N	电子式 电磁式	过载、短路、 漏电保护	380	10~100	0.03~0.1	一般型
	JXM3L-100 JXM3L-200 JXM3L-400	3P, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	400	40~400	0.03~0.5	一般型 延时型
上海电器股份有限公司人民电器厂	RMM1L-100 RMM1L-225	3P, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	400	16~225	0.03~0.5	一般型 延时型
沈阳金钟宏特电器有限公司	FAM2L-100M FAM2L-225M FAM2L-400L	3P, 4P	电子式	过载、短路、 漏电保护	400	16~400	0.03~0.5	一般型 延时型

① 一般型在发生故障分断时没有故意延时，即瞬时动作；延时型在 $2I_{\Delta n}$ 时的极限不驱动时间应大于或等于 0.06s。

表 2.9-26 剩余电流继电器和剩余电流监视器

制造商	产品型号	互感器贯穿孔直径 (mm)	漏电脱扣形式	主电路额定电压 (V)	辅助电源额定电压 (V)	额定电流 (A)	额定剩余动作电流 (A)	分断时间 ^①
南京电力高等专科学校附属工厂	LJM	φ31、φ41、φ64	电子式	380	220	150、250	0.1~0.35	一般型
	LJY II-250	φ41、φ64	电子式	380	220	250	0.2~0.5	延时型
杭州临安漏电保护器厂	SDLB-9		电子式	380	220	250	0.075~0.5	一般型
邳州市国龙电器有限公司	GLJ-250/II		电子式	220	—	250	0.5	一般型
青岛理康电子科技有限公司	QLKJ4-100A		电子式	380	220	100	0.075	一般型
无锡市新技电器厂	DBL-5B		电子式	380/220	—	250	0.05~0.15	一般型
河南省温县宏达电子仪器厂	DDL-II		电子式	380	220	250	0.1~0.15	一般型
日照市星斗电器有限公司	JD10-60		电子式	380	220	250	0.03~0.5	一般型
江苏淮阴苏益电器有限公司	JLM		电子式	380	220	250	0.1~0.5	一般型
杭州乾龙电器有限公司	JD6-III		电子式	380	220	63~400	0.1~0.5	一般型 延时型
焦作市黄悦电器有限公司	JHYL1-250		电子式	220/380	—	250	0.3~0.5	一般型
江阴市文林低压电器厂	JWLL1-250		电子式	220/380	—	250	0.3~0.5	一般型
上海赛富电器有限公司	HSFL1-250		电子式	220/380	—	250	0.3~0.5	一般型
青岛楼山电控设备有限公司	QLDL1-250		电子式	220/380	—	250	0.3~0.5	一般型
通州市西华电子电器厂	SBD		电子式	380	—	150、250	0.1~0.2	一般型
杭州临安万达电器有限公司	HWDL-250		电子式	220/380		60~250	0.3~0.5	延时型
北京 ABB 公司	RD2 剩余电流监视器	φ29 φ35 φ60 φ80 φ110	电子式	230/400	230/400		0.03~2	0~5s 可调

① 一般型在发生故障分断时没有故意延时，即瞬时动作；延时型在发生故障分断时有人为的故意延时。

表 2.9-27 移动式剩余电流动作保护电器

制造商	产品型号	结构型式	极 数	漏电脱扣形式	额定电压 (V)	额定电流 (A)	额定剩余动作电流 (A)	分断时间 ^①
佛山市新基德电子厂有限公司	LBX-10 LBX-16	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	220	10, 16	0.01	一般型
	LBX-10-Ⅱ LBX-16-Ⅱ	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	220	10, 16	0.01~0.03	一般型
	LBX (F) -Ⅲ	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	220	10, 16	0.01~0.03	一般型
浙江正泰电器股份有限公司	NLB5-16	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	230	6, 10, 16	0.015~0.03	一般型
番禺旭东阪田电子有限公司	KD-L2210PE	剩余电流保护插头	2P	电子式	220	10	0.01~0.03	一般型
宁波麟晟电气有限公司	ATL21-10 ATL21-16	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	220	10, 16	0.01~0.015	一般型
中山市开普电器有限公司	KPPR-10-BI KPPR-10-CI KPPR-16-CI	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	230	6, 10, 16	0.01~0.03	一般型
	KPPR-06-BP KPPR-06-CP KPPR-10-BP KPPR-10-CP KPPR-16-CP	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	230	10, 16	0.01~0.03	一般型
常熟市立得电器有限公司	LBC-10-1 LBC-16-1	剩余电流保护插头	2P 2P+PE	电子式	220	10, 16	0.01	一般型
乐清市东亚电器开关厂	LBD-10	剩余电流保护插头	2P	电子式	220	10	0.01	一般型
顺德市伦教镇华海电子元件厂	LBC-10 LBC-16	剩余电流保护插头	2P 2P+PE	电子式	220	10, 16	0.01	一般型
欣灵电气股份有限公司	XLDAL-16	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	230	10	0.01	一般型
广东珠江开关有限公司	ZKT1L-10	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	230	10	0.01	一般型
佛山市华正电器开关厂有限公司	LTD-10-30 LTD-16-30	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	220	10, 16	0.03	一般型
上海第三开关厂	ATL8-10	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	220	10	0.01	一般型
常熟市斯佳登电器有限公司	BLC2-10-Ⅱ	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	220	10, 16	0.01~0.03	一般型
顺德市容桂区博宇电器燃具厂	LTR-10	剩余电流保护插头	2P	电子式	220	10	0.015	一般型
乐清市安德惠电器有限公司	LBC-10- I	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	220	10	0.01	一般型
余姚市力顺电器有限公司	LBX-10-1	剩余电流保护插头	2P	电子式	220	10	0.01	一般型
余姚市嘉荣电子电器有限公司	LBY-16	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	220	10, 16	0.01~0.03	一般型
常熟市银行器具厂	YDT1-10-Ⅱ	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	220	10	0.01	一般型
晋江振泰科技有限公司	ZTT-10-Ⅱ	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	220	10	0.01	一般型
南海市桂城松成电子电器厂	SN-10AⅢ	剩余电流保护插头	2P	电子式	220	10	0.03	一般型
中山市黄圃镇华元电子元件厂	LBC	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	220	10, 16	0.01~0.03	一般型
乐清市创扬电气有限公司	LBC-16	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	220	10, 16	0.01~0.03	一般型
温州东塑电器有限公司	ATL23-10	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	220	10	0.01~0.03	一般型

续表								
制造商	产品型号	结构型式	极 数	漏电脱扣形式	额定电压 (V)	额定电流 (A)	额定剩余动作电流 (A)	分断时间 ^①
佛山市顺德区恒成科技有限公司	GHCT1-10 GHCT1-16	剩余电流保护插头	2P 2P+PE	电子式	220	10, 6	0.01~0.03	一般型
深圳市宝克振电子有限公司	SP351	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	220	10	0.01	一般型
新艺集团有限公司	XYIL-10 XYIL-16	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	220	10, 16	0.01~0.03	一般型
南京南新电气配套设备有限公司	NLB-16	剩余电流保护插头	2P+PE	电子式	220	10, 16	0.01	一般型
常熟市虞山镇华进电器厂	HWAL1-10/ I HWAL1-10/ II	剩余电流保护插头	2P	电子式	220	10	0.01	一般型
上海突破保安电器有限公司	LDC139V	移动式剩余电流保护插座	2P+PE	电子式	220	10	0.03	一般型
上海特威希电气技术有限公司	TVC2002K-1	移动式剩余电流保护插座	2P 2P+PE	电子式	220	10, 16	0.015	一般型

① 移动式剩余电流动作保护电器一般均用于直接接触保护，所以分断时间均为一般型（瞬时动作），没有延时动作型。

第 10 章 接触器和起动器

1 用途与分类

1.1 用途

接触器和电动机起动器都是应用广泛的开关电器，主要用于频繁接通或分断交、直流主电路和大容量的控制电路，可远距离操作，配合继电器可以实现定时操作、联锁控制及各种定量控制和失电压及欠电压保护，广泛应用于自动控制电路，其主要控制对象是电动机，也可用于控制其他电力负载，如电热器、照明、电焊机、电容器组。接触器和起动器均属于控制电器。

接触器是一种用于远距离频繁地接通和断开交直流主电路及大容量控制电路的电器，其操作频率有时高达每小时几十次、几百次甚至上千次，因此，对接触器的主要要求是：

- (1) 灭弧性能好，分断电流时燃弧时间短，过电压低，喷弧距离小。
- (2) 触头材料具有良好的导电、导热性能，耐腐蚀、抗熔焊性能好，降低触头的温升和提高电寿命，同时要求触头的工艺性好，价格低廉。
- (3) 结构设计合理，机械寿命高，并具有足够的承受短时耐受电流的能力。

如图 2.10-1 所示为 CJ40、CJ45、CJ12、3TF 系列交流接触器典型产品的外形图。

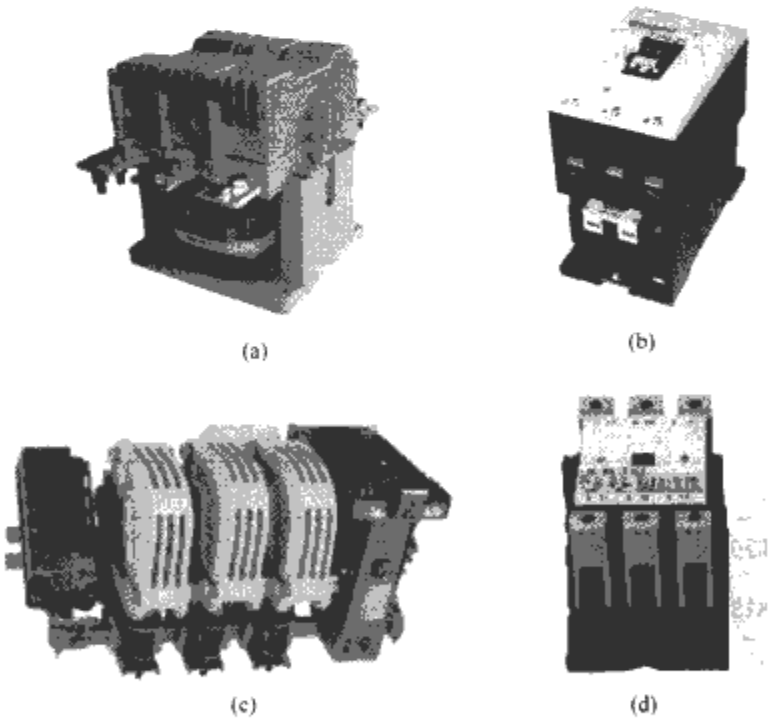


图 2.10-1 交流接触器典型产品的外形图
(a) CJ40；(b) CJ45；(c) CJ12；(d) 3TF

起动器主要用于控制电动机的起动、停止或反转，并带有过载保护功能，通常由两大部分构成，即对电动机主电路进行通断控制的执行元器件部分（一般为接触器）和对电动机故障进行保护的检测元件部分（一般为热继电器或电子式过载继电器）。对起动器的主要要求是：

- (1) 起动器的结构设计合理，主要元器件选型合理。
- (2) 控制与保护功能完善。

如图 2.10-2 (a) 所示为 QC25 系列（直接）电磁起动器典型产品的外形图，如图 2.10-2 (b) 所示为开启式的 QJX2 系列“星—三角”减压起动器外形图。

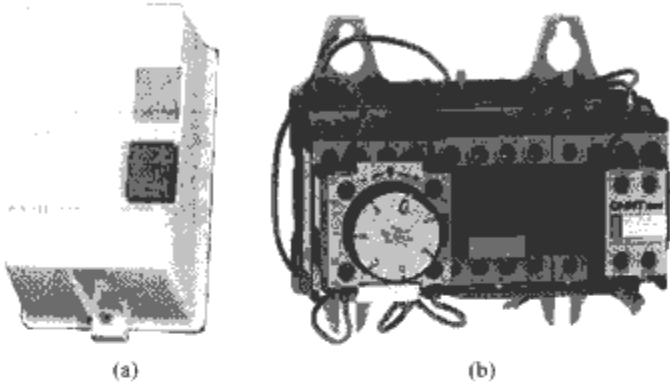


图 2.10-2 起动器典型产品外形图
(a) QC25 系列；(b) QJX2 系列

接触器和电动机起动器主电路和辅助电路通常选用的使用类别及其代号见表 2.10-1。

表 2.10-1 接触器和电动机起动器主电路和辅助电路通常选用的使用类别及其代号

电流种类	类别	典型用途	有关产品标准
交流	AC-1 AC-2	无感或微感负载、电阻炉 绕线转子电动机的起动、 分断	GB 14048.4— 2003《低压开关设备 和控制设备 机电式 接触器和电动机起动 器》
	AC-3	笼型异步电动机的起动、 运转中分断	
	AC-4	笼型异步电动机的起动、 反接制动与反向运转①、点 动②	
	AC-5a	控制放电灯的通断	
	AC-5b	白炽灯的通断	
	AC-6a	变压器通断	
	AC-6b	电容器组的通断	
	AC-8a	具有过载继电器手动复位 的密封制冷压缩机中的电动 机控制	
	AC-8b	具有过载继电器自动复位 的密封制冷压缩机中的电动 机控制	
	AC-7a AC-7b	家用及类似用途的微感负 载 家用电动机负载	GB 17885—1999 《家用及类似用途机 电式接触器》
	AC-14 AC-15	控制小容量电磁铁负载 控制交流电磁铁负载	GB 14048.5—2001 《低压开关设备第 5-1 部分：控制电路电器 和开关元件 机电式 控制电路电器》

表 2.10-3 起动器的用途与分类

起动器的分类			用 途	
笼型异步电动机	直接 (全压) 起动器	电 磁	供远距离频繁直接起动、停止三相笼型异步电动机，并使其反向，具有过载、断相及失电压保护	
		手 动	供频繁直接起动、停止三相笼型异步电动机，并使其反向，可提供过载、断相及失电压保护	
	减压起 动器	星—三角 减压起动器	电磁	供三相笼型异步电动机作星—三角减压起动及停止用，具有过载、断相及失电压保护
			手动	供三相笼型异步电动机作星—三角减压起动及停止用
		延边星—三角 减压起动器	电磁	供三相笼型异步电动机作延边星—三角减压起动及停止用，具有过载、断相及失电压保护
			手动	供三相笼型异步电动机作不频繁降压起动及停止用，具有过载、断相及失电压保护
		电抗减压起动器		供三相笼型异步电动机减压起动
		电阻减压起动器		供三相笼型异步电动机减压起动
	综合起动器		供远距离直接起动、停止三相笼型异步电动机，具有过载、断相、短路、失电压保护	
绕线转子异步电动机	变阻式转子起动器		供远距离直接起动、停止三相绕线转子异步电动机	

软起动器是采用电力电子技术、自动化控制技术和微处理器技术的新型控制电器设备。与传统起动设备相比，起动更平滑，对电网冲击更小，此外还具有限流调节、软停车、节能、智能通信、智能保护等传统起动方式所不具备的功能。详细内容见本篇第 11 章。

2 电磁接触器的结构型式及组成部件

2.1 电磁接触器的结构原理概述

电磁接触器（本章简称“接触器”）由主体和附件构成。主体主要由主触点、灭弧室、电磁系统、反力弹簧、支架、外壳等组成，附件主要包括辅助触头、机械联锁模块等。接触器的性能和参数与它的总体布置有关，触头、灭弧室、电磁系统结构方案以及传动方式的不同，对机电寿命与性能参数有很大的影响。接触器的总体结构主要有转动式和直动式两大类（见图 2.10-3~图 2.10-5）。转动式结构又分为单断点和双断点两种型式。直动式结构都是双断点型式，又分为正装直动式和倒装直动式两种型式。图 2.10-6 和图 2.10-7 所示分别为转动式和直动式接触器的触头闭合过程，(a)、(b)、(c) 分图分别为触头打开、刚接触和闭合到底三种状态。

接触器的工作原理：当电磁系统线圈通电，衔铁吸合时，动合主触头和动合辅助触头接通，动断主触头和动断辅助触头分断，反力弹簧储能；电磁系统断电衔铁释放时，则

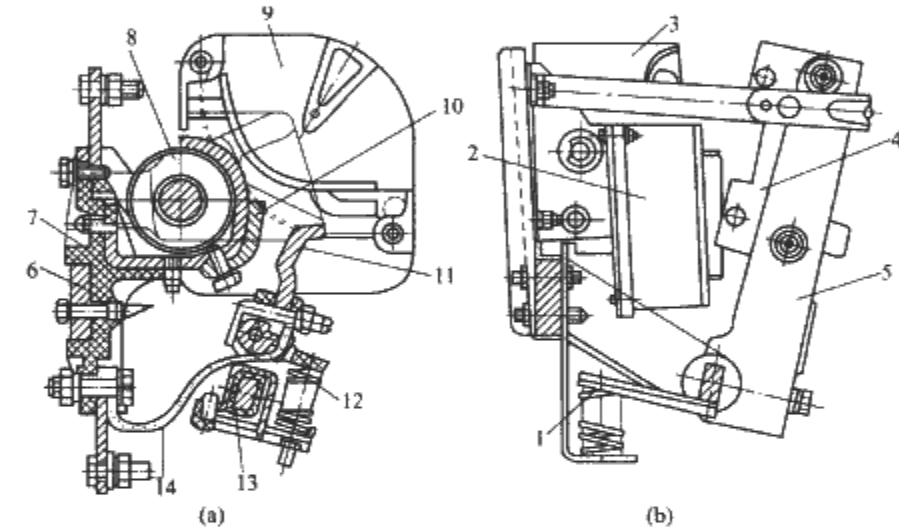


图 2.10-3 转动式单断点交流接触器结构示意图

(a) 触头灭弧系统剖视图；(b) 电磁系统剖视图
1—反力弹簧；2—线圈；3—铁心；4—衔铁；5—支架；6—安装条板；7—绝缘座；8—串联磁吹线圈；9—多纵缝灭弧室；10—静触头；11—动触头；12—触头弹簧；13—绝缘转轴；14—软连接线

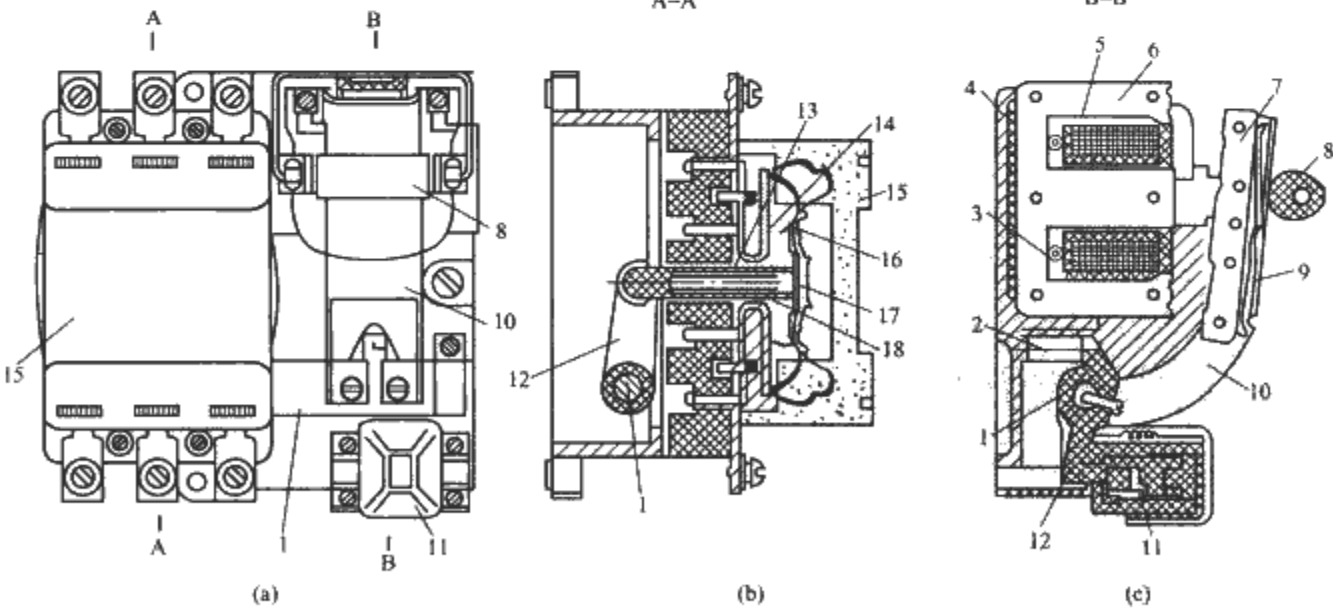


图 2.10-4 转动式双断点交流接触器的结构示意图

(a) 顶部结构示意图；(b) 触头灭弧系统剖视图；(c) 电磁系统剖视图
1—轴；2—反力弹簧；3—缓冲弹簧；4—缓冲件；5—线圈；6—铁心；7—衔铁；8—停挡（缓冲件）；9—片状弹簧；10—支架；11—辅助触头；12—杠杆；13—动触头支架；14—静触头；15—灭弧室；16—动触头；17—片状弹簧；18—触头弹簧

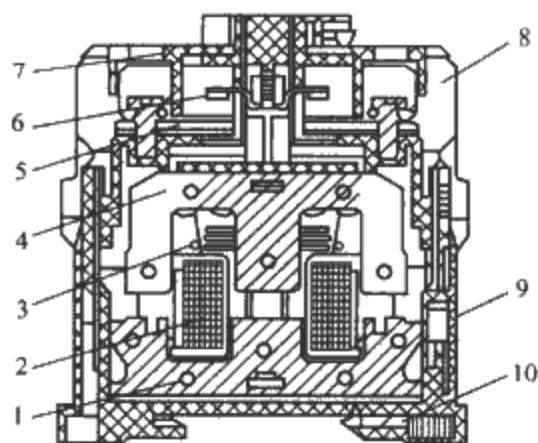


图 2.10-5 直动式交流接触器的结构示意图
1—铁心；2—线圈；3—反力弹簧；4—衔铁；
5—静触头；6—桥形动触头；7—灭弧室；
8—躯壳；9—底座；10—滑块（卡轨用）

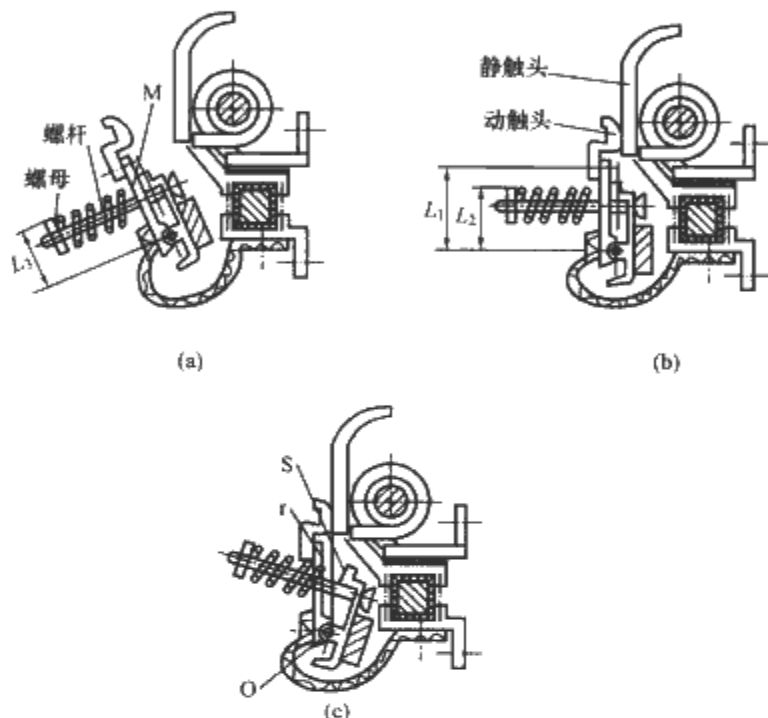


图 2.10-6 转动式交流接触器的触头闭合过程
(a) 触头打开位置；(b) 触头刚接触位置；
(c) 触头闭合到底位置

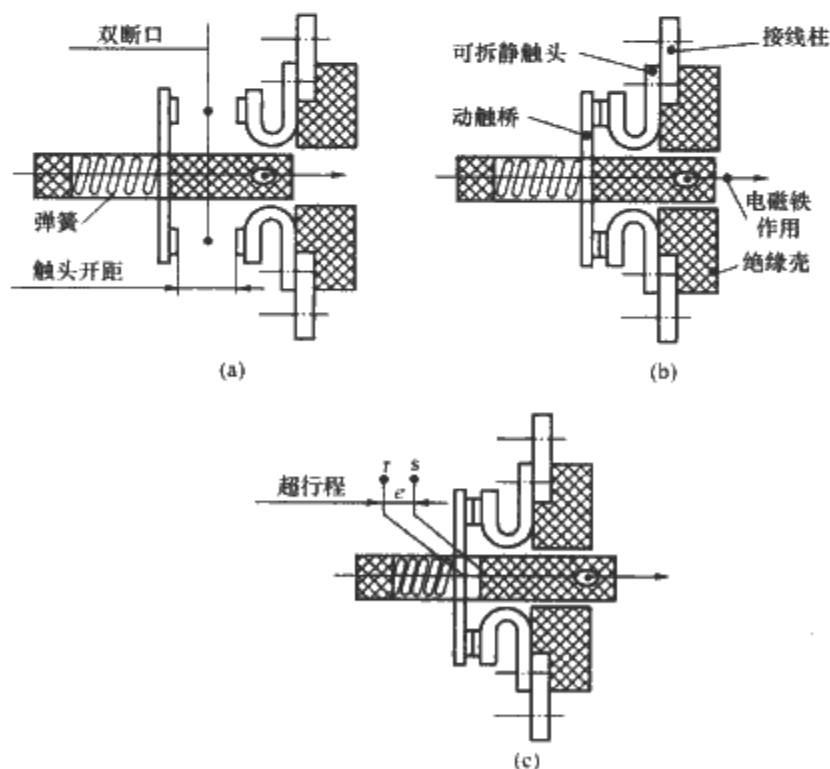


图 2.10-7 直动式交流接触器的触头闭合过程
(a) 触头打开位置；(b) 触头刚接触位置；
(c) 触头闭合到底位置

相反，当接触器电磁线圈不通电时，弹簧的反作用力和衔铁心的自重使主触点保持断开（或闭合）位置。接触器的主触

头用于接通和分断主电路，额定电流比较大；而辅助触头用于接通和分断控制电路，额定电流比较小。

2.1.1 电磁系统传动方式

(1) 直动式。电磁系统的衔铁通过触头支持直接带动触头作直线运动，用于直动式接触器。

(2) 转动式。电磁系统的衔铁通过支架使轴转动，轴带动杠杆带动触头运动，用于转动式接触器。

2.1.2 布置方式

(1) 正装式。触头系统在前面，电磁系统在后面（靠近安装面），其优点为更换维修触点比较方便。

(2) 倒装式。电磁系统在前面，触头系统在后面（靠近安装面），其优点是更换线圈方便，便于安装多种附件，扩大使用功能。而且触头系统的接线端靠近安装面，使接线距离缩短。

2.2 触头

接触器的触头有双断点直动式桥形触头和单断点转动式指形触头两类。

单断点转动式指形触头常采用铜质或铜基合金材料，其价廉且易于加工。该形式触头的优点为：

- 1) 闭合与断开过程中有滚动和滑动摩擦，能清除触头表面的氧化物，以保证接触电阻的稳定。
- 2) 触头接触压力大，电动稳定性高。
- 3) 触头参数比较容易调节。

单断点转动式触头的主要缺点：

- 1) 仅一个断口，触头开距大，从而导致接触器的体积较大。
- 2) 触头闭合时冲击能量大，并且有软连接，不利于机械寿命的提高。
- 3) 由于采用铜基触头，触头压力较大，从而磁系统控制功率大。

双断点直动式桥形触头常采用银质或银基合金材料，也可以用银铜复合材料。该形式触头的优点为：

1) 具有两个串联的断口，有两个有效的灭弧区域。交流接触器可利用两个断口的近阴极效应可靠地灭弧。一般额定电压 400V 及以下，额定电流 20A 及以下的小容量交流接触器不需加装特殊的灭弧装置；额定电流为 20~80A 的交流接触器可加装引弧片或利用回路电动力吹弧，在双断口的配合下能可靠地熄灭电弧；而额定电流大于 80A 的交流接触器需要加装栅片或其他形式的灭弧室。

2) 触头开距小，使接触器结构紧凑，接触器的体积较小。

3) 触头闭合时冲击能量小，不用软连接，有利于机械寿命的提高。

双断点直动式桥形触头的主要缺点：

- 1) 闭合与断开过程中没有滚动和滑动摩擦，不能自动清除触头表面的氧化物。
- 2) 触头材料由于大部分采用银基合金，价格较贵。
- 3) 每个触点的接触压力小，电动稳定性较低。
- 4) 触头参数不易调节。

2.3 灭弧系统

2.3.1 绝缘材料灭弧罩

利用回路的自生电动力拉长电弧或加装 U 形铁磁性吹弧件吸引电弧，使之与陶土灭弧罩或塑料灭弧罩接触，电弧被拉长和冷却而熄灭。交流接触器也可以利用近阴极效应熄

弧，这是一种最简单的灭弧装置，适用于容量较小的交流接触器，操作频率可以比较高。如图 2.10-8 所示为回路自生电动力拉长电弧示意图，其中图 2.10-8 (a) 为直式电流出线，图 2.10-8 (b) 为 U 形电流出线，U 形电流出线可产生更强的吹弧电动力。

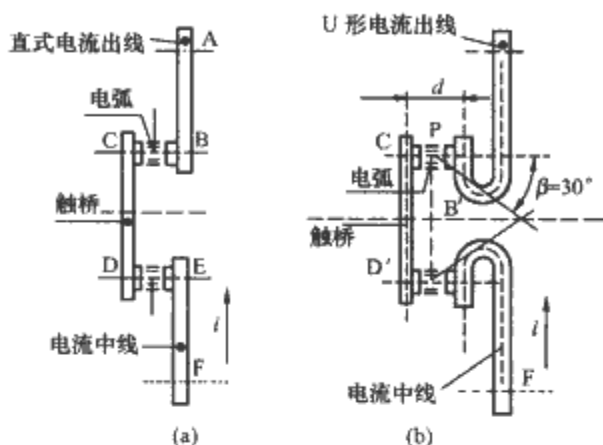


图 2.10-8 回路自生电动力拉长电弧示意图
(a) 直式电流出线；(b) U 形电流出线

2.3.2 多纵缝灭弧室

电弧在回路电动力作用下被迅速拉长和进入纵缝中，电弧被分成多条细弧，并且迅速冷却而熄灭，用于操作频率比较高和额定电流较大的接触器中，灭弧能力较强。

2.3.3 栅片灭弧室

电弧在回路电动力及铁栅片的吸力作用下，进入栅片之间，被栅片分割成多个串联的短弧，由于直流电弧的近极压降或交流电弧的近阴极效应而熄灭电弧。栅片一般是用钢片制成，它对电弧电流有吸引作用，在电弧产生时栅片将电弧吸引到灭弧室内，当电弧越出灭弧室时栅片又将电弧朝灭弧室回拉，因此这种灭弧室的喷弧距离较小。由于它利用电流自然过零而熄灭电弧，所以分断时过电压低。栅片灭弧室常用于交流接触器，尤其适用于较高工作电压的交流接触器。但是，栅片吸收电弧能量后温度上升快，不适合于太高的操作频率。

2.3.4 串联磁吹和绝缘材料灭弧室

磁吹线圈是装在直流接触器或交流重任务接触器各级主电路中的特殊线圈，绕有一定的匝数。

当触头断开时，电流流经线圈产生磁场，它将电弧吹入灭弧室，电弧在灭弧室中受到冷却，以至最终熄灭，从而断开电流。如果磁吹线圈产生的磁场太弱，不足以将电弧从触头吹入灭弧室，则由装在灭弧室中的永久磁铁来完成这一任务。对于交流接触器来说，借助各级电路中的回路来实现类似的效应。电弧的熄灭在这里的重要性并不能以直流灭弧时的尺度等量齐观，因为交流在每次半波后都实现过零。这种方法也可称为“磁吹”。如图 2.10-9 所示是串联磁吹线圈引弧结构示意图。

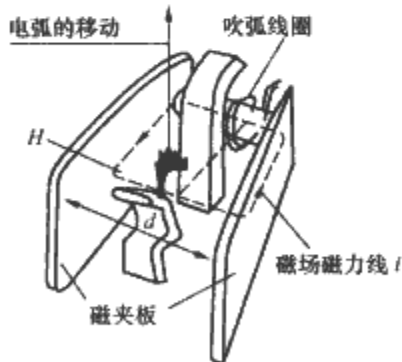


图 2.10-9 串联磁吹线圈引弧结构示意图

串联磁吹线圈在弧区产生较强的磁场，电弧在磁场中受到较强的电动力作用，而被拉长和迅速进入绝缘灭弧室中，被灭弧室壁冷却而熄灭。灭弧室由陶土或耐弧塑料制成，有多纵缝、横隔板、窄缝和迷宫式等多种结构。这种

灭弧室的热量易于散出，耐热性好，故可以用于较高的操作频率。直流接触器常用这种灭弧装置，但是，它的喷弧距离大，声光效应大，过电压较高和用铜量大。此外，用于交流接触器时，由于吹弧线圈的铁心和铁夹板（铁轭）中有铁损耗，使其磁通落后于电流一个相位差角，而产生使电弧反吹的电动力等缺点，因而交流接触器中很少采用这种灭弧室。

接触器在分合电路时产生的电弧使灭弧室中充满游离气体并逸出灭弧室外。因此灭弧室外与其他带电元件或地应有一定的距离，防止电弧或游离气体喷出后，通过其他带电元件造成放电或短路。

2.4 电磁系统

交流接触器的电磁系统常采用单 U 形直动式、双 E 形直动式和双 U 形转动式等。直流接触器的电磁系统多采用拍合式、直动式。近年来直动式结构已在中小容量直流接触器中广泛应用。

电磁系统的结构及特性对接触器的寿命影响很大，主要有以下几个方面。

2.4.1 吸力特性与反力特性配合

吸力特性与反力特性的配合应在保证接触器可靠工作的前提下，使衔铁与铁心碰撞能量最小。如图 2.10-10 所示是吸力特性曲线与反力特性配合曲线示意图。

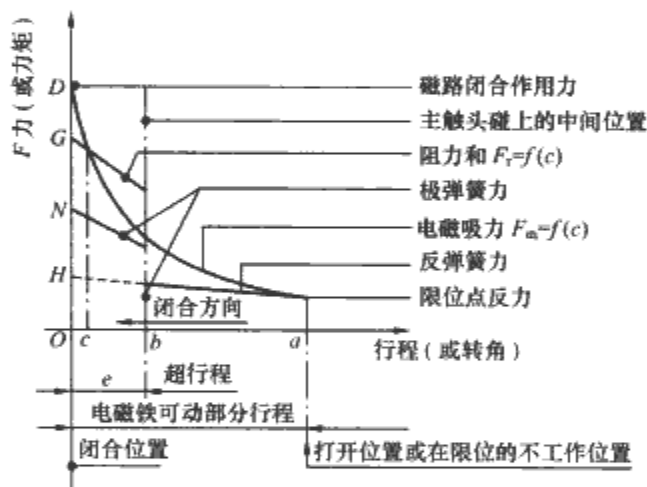


图 2.10-10 吸力特性与反力特性配合曲线

2.4.2 铁心缓冲零件

用硅橡胶、弹簧等制成缓冲零件，放在衔铁、静铁心和线圈等零部件的上面或下面，以吸收衔铁的动能，减少它与铁心或其他零件的撞击力，以减轻铁心的二次振动，避免触头的二次或多次通断。

2.4.3 交流电磁系统的分磁环（短路环）

交流电磁系统的分磁环是影响交流接触器机械寿命的重要因素。在衔铁与铁心碰撞时，分磁环悬伸部分的根部及转角处应力最大，常常容易断裂。如果将分磁环的两个长边均嵌紧于铁心或衔铁极面的槽内，并用胶粘剂将分磁环粘牢在铁心或衔铁上，可以减少断裂现象。

2.4.4 铁心的硬化处理

对交流接触器的铁心极面和直流接触器的转动式电磁铁作为支点的棱角及转动摩擦部位进行硬化处理，以提高其耐磨性。

2.4.5 合理选材以减少机械磨损

对于衔铁沿轴转动的电磁铁，应选用合理的轴及轴承材料，如金属—塑料或塑料—塑料。轴承或直动式电磁系统的导轨可以选用含有少量二硫化钼或石墨的塑料，以减少机械磨损。

2.4.6 新型节能运行电磁系统

2.4.6.1 传统电磁系统的局限

(1) 交流电磁系统。

1) 电磁吸力是依靠分磁环形成的两个交变磁场的磁力叠加的直流分量来做功的,因而效率低、铁心体积大、线圈能耗高。

2) 功率因数低,线圈电流大,发热严重,既浪费能源又使线圈过早老化、损坏。

3) 当衔铁机械嵌卡、超载或低电压工作带载困难时,线圈都会烧毁。

4) 有工频振动噪声。对于接触器来说,这种振动在低电压时还会导致触点电弧产生,烧毁触点,降低产品可靠性及使用寿命。

5) 线圈电流大,导致线圈体积大,进而导致铁心体积大,浪费巨大的铜材、铁材。

(2) 直流电磁系统。

1) 因电磁系统工作全过程线圈电流不变,使得保持状态时 95% 以上的能耗被浪费,这些被浪费的能耗用于加热线圈,使线圈发热而过早老化、损坏。

2) 为了减少线圈发热,线圈导线直径被迫加大,导致铜材的巨大浪费。

3) 线圈体积增大,使得铁心体积增大,导致钢材的巨大浪费。

4) 体积大、能耗大,极大地提高了生产成本。

2.4.6.2 利用双线圈技术实现电磁系统的节能

实现电磁系统的节能有多种方法,其中双线圈技术应用较多。所谓双线圈技术系指线圈分为起动、保持两部分,使用一个电源供电,分时工作在起动吸合阶段和保持闭合阶段。

该节能降噪线圈的结构为一个特殊设计的双绕组线圈和一个桥式整流堆,如图 2.10-11 所示。当按下起动按钮 SB1,绕组 1 和绕组 2 同时通电,绕组 1 中流过交流电流,

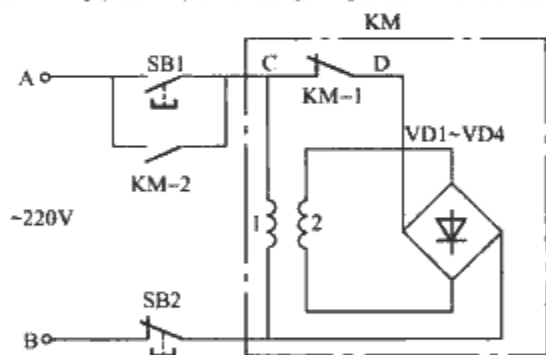


图 2.10-11 节能线圈的结构原理图

绕组 2 中流过的电流为经过全波整流的直流电流,两个电流产生的合成磁通使操作电磁系统的衔铁开始吸合。当接触器的主触头已接通且衔铁吸合到位时,接触器 KM 的动断辅助触头 KM-1 断开,接触器转换为保持状态,即实际上已转换成图 2.10-12 所示的简单等效电路。此时,一次侧绕组 1 接交流电源,二次侧绕组 2 接整流器。在绕组 1 和绕组 2 的合成磁动势作用下,铁心中产生脉动直流的磁通和电磁吸力,使衔铁保持于闭合位置上,接触器进入正常工作状态。由于这时接触器线圈中流过的基本上为直流电流,所以接触

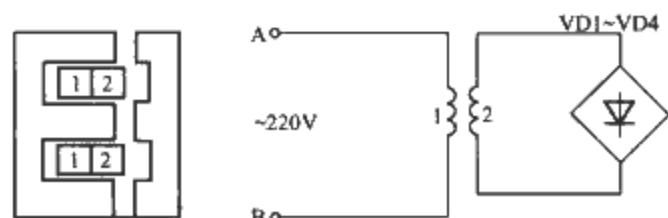


图 2.10-12 节能线圈的等效电路

器铁芯中基本上不存在涡流损耗,功耗及发热量都很小,而且由于直流电流产生的电磁吸力方向恒定,因此接触器衔铁也不会产生振动。

2.4.6.3 利用电子线路实现线圈节能

(1) 双线圈技术存在的问题。

1) 双线圈起动与保持原始切换方法是应用动断辅助触头,即起动到位后将起动线圈切换到保持线圈。该方法在衔铁被嵌卡或供电电压过低时容易出现起动不到位,导致切换失效,使得线圈在大电流下烧毁。

2) 起动与保持电流随外部供电电压变化而变化,当低电压工作合理时,高电压就会浪费能源并可能烧毁线圈;反之,低电压时不能工作且烧毁线圈。

3) 获得保持电流的方法通常是变压器降压,电容、电阻或电感限流等。这些方法的缺点是体积较大、功率因数较低、可控性较差。

4) 没有断电后切断续流的措施,断电衔铁释放滞后严重。

5) 辅助触头切换易产生电弧,切换可靠性差。

(2) 新型电子式节能运行电磁系统。20 世纪 90 年代中期,在发达国家出现了新一代电子式节能技术,其优点表现在:

1) 起动定时定电流,能保证电磁系统在较宽的电压范围内可靠地起动,节能效果好。

2) 采用脉宽调制方法限制保护电流,产品体积较小。

3) 采用集成电路(甚至单片机)、厚膜电路技术,使产品体积小、可靠性高。

4) 解决了断电后的切断续流难题。

(3) CMOS 集成电路及 IGBT 开关技术。将上述方法及其他功能集成优化,设计出专门的 CMOS 集成电路,除了具备上述最小功耗性、宽电压性外,还有集成度高、抗干扰能力强、工作可靠、数字模拟互补等优点。此外另有如下几个优点:

1) 提高起动速度。在 CMOS 集成电路的电源尚未建立时起动电压就能加到线圈上(即起动电压加到电子节电模块同时也加到了线圈上),有效提高了起动速度。

2) 便于宽电压。CMOS 集成电路的电源电压允许范围极宽(3~20V)、功耗极小(电子节电模块集成电路及其外围器件功耗 0.7W),输入电压范围变化不影响 CMOS 集成电路的正常工作,所以控制电路为实现宽电压提供了前提。

3) 减少元器件数量。电子节电模块中集成电路的功能还表现为外围器件只有少量几个,加上芯片本身、整流桥、功率管、续流管、保护用压敏电阻等。器件少、功耗小,有可靠性高的优点。

4) 低功耗。IGBT 开关既有晶体管开关低管压降节能的优点,又有场效应管压控的控制电路低功耗的优点,这是电子节电模块低功耗的另一个原因。加上上述低功耗理由,电子节电模块自身功耗只有 1.5W。IGBT 与 COMS 的有效结合还提高了电子节电模块的抗干扰能力。

2.5 反力弹簧

反力弹簧一般为双圆柱螺旋弹簧或单圆锥螺旋弹簧(又被称为塔形弹簧)。反力弹簧的力值和触头弹簧的力值为反力特性的主要组成部分。双圆柱螺旋弹簧所得到的反力是两个圆柱螺旋弹簧力值的叠加,所以相对比较陡峭;而单圆锥螺旋弹簧压并是从弹簧大径端开始,起始比较平缓,有利于降低起动时需要的吸力,减小电磁系统尺寸。还有用扭簧作为反力弹簧的,这种反力的优点是反力可调,容易得到较好

的吸力—反力配合特性。

2.6 支撑和壳体

接触器的支撑和壳体大多数为塑料件，必须具有良好的机械强度、绝缘性能、耐老化性能和阻燃性能，支撑载流零件时还需要较高的耐热性能和耐电弧烧损能力等。国内外新一代中小容量交流接触器普遍采用环保型热塑性工程塑料，不含有害物质，产品寿命终了时外壳材料可以回收。

2.7 附件

2.7.1 辅助触头

辅助触头分标准瞬动辅助触头、对尘雾保护型瞬动辅助触头及延时动作辅助触头模块。辅助触头模块一般采用密封结构，防止灰尘进入，以保证工作的可靠性。采用大开距大超程的辅助触头，具有较高的通断能力。

标准瞬动辅助触头一般有头部安装和侧面安装两种形式。头部安装的辅助触头模块简便滑卡在接触器上，电气设备修改和调整十分方便。侧面安装的辅助触头模块可以减小设备的深度。

对尘雾保护型瞬动辅助触头（IP54）保证了接触器和程序控制器在恶劣工作环境（混凝土、塑料、木屑灰尘等）下的可靠接触。

延时动作辅助触头模块一般有电子式延时模块和气囊式延时模块，相当于延时继电器。其触头对下一级控制回路进行延时控制。电子式延时模块有接线端头用于安装并直接接在线圈端子上，不用另外接线，有通电延时和断电延时两种。电子式延时模块给线圈以延时作用，从而辅助触头就随之延时接通或关断。气囊式延时模块也有通电和断电延时，安装方式为沿滑轨滑插安装（同瞬动辅助触头模块）。

2.7.2 机械联锁模块

机械联锁指通过机械零部件实现两台接触器工作状态的联锁（并非电气联锁），例如用摇臂、连杆等来操作的联锁。机械联锁模块可以使两台接触器相互机械联锁，在两台联锁的接触器中有一台已处于接通状态后，另一台就不能接通，这样可以在负载换接时防止两台接触器同时闭合造成电源短路。机械联锁不允许接触器的延时后续运行。两台接触器在机械上的相互联锁也能防止由于机械振动使它们同时接通。

2.7.3 自锁模块

接触器的自锁模块相当于自锁继电器。装有自锁模块的接触器闭合后，就被自锁模块锁住，此时接触器的线圈可以断电，接触器仍处于闭合状态；若需断开时，只需将自锁模块再次通电，或推动手动推杆，使自锁模块的锁扣脱开，接触器的电磁铁释放，动合触头断开。可以达到交流接触器节能和无声运行的目的。

2.7.4 接口模块

这些模块是作为 PLC 和接触器之间的接口，它们是电流放大器，允许程序控制器直接控制接触器的线圈。这些模块一般直接安装在接触器的线圈端子上，不需要连接线。通常有三种模式：

（1）具有光电耦合的固体电路模块。这种模块特别适合于低电平 TTL 或 CMOS 电路控制接触器，它的控制电压范围为 DC 5~24V，并能给线圈提供 AC 250V 电压。

（2）继电器接口模块。这种模块主要用于 DC 24V 或 DC 48V 的控制接触器。

（3）具有手动强制开关继电器接口模块。强制操作用于手动方式调整或检修等时来控制接触器。

2.7.5 接触器的线圈浪涌抑制模块

接触器的线圈浪涌抑制模块用来限制分断电感性回路（接触器的控制回路）时产生的操作过电压对控制回路的影响。浪涌抑制模块可以作为各类型和各制造等级的接触器附件供货，也可以装在接触器中。它与接线端子并联，为了抑制过电压可使用不同的方法，方法有以下几种：

（1）自振荡二极管模块。它只能用于直流操作的电磁式操动机构。当开断时，储藏的能量所产生的电流倾向于与开断前相同方向流动，二极管允许它流过，由于导通门槛低（ $<1V$ ），它就避免在线圈两端产生任何过电压，但必须保持正确的极性。当回路断开时，二极管将用于与各种过电压的线圈短接，过电压中具有与控制电压相反的极性，因为自振荡二极管会延长接触器的释放时间，所以，在使用时需谨慎小心。

（2）RC 电路模块。欧姆电阻与电容器相串接的电路，用于交流操作的接触器，削减分断过电压的高度与陡度（上升时间）。电容器减少线路固有振荡频率大约到 150Hz，并减少过电压最大只能到 $3U_c$ 。（ U_c 为控制电源电压）。与电容器串联的电阻限制当控制触头闭合时电容器的充电电流。RC 线路特别适用于对 du/dt 敏感的电子式控制电器的输出级（例如双向晶闸管）。对具有低通特性的输出级，它并不很适用。

（3）压敏电阻（可变电阻模块）或双向稳压管模块。

压敏电阻模块是非线性电阻（半导体），能用于交流或直流电磁回路。压敏电阻是一个随着加于其两端电压上升，而电阻值按照非线性比例下降的元件，它能产生崩落效应，该效应能使过电压跌落，大约为 $2U_s$ ，但不能改变线圈的固有振荡频率。压敏电阻线路十分适用于保护具有低通特性的输出级，而并不适用于对 du/dt 敏感的输出级。

双向稳压管模块是一个半导体器件，如同两尾对接的齐纳二极管，它优于不能改变时间特性的压敏电阻模块。

2.8 常用接触器的结构特点

常用接触器的结构特点见表 2.10-4。

表 2.10-4 常用接触器的结构特点			
类 型	型 号	结 构 特 点	备 注
交流电磁式	CJ20	(1) 采用双断点直动式结构，正装立体布置 (2) 40A 及以下等级采用 E 形铁心，63A 及以上等级采用 U 形铁心。非磁性气隙置于静铁心底部正中，可确保去磁间隙不变 (3) 采用银基触头，63A 及以上等级采用船形动触桥，静触头采用型材，并装有铁质引弧角 (4) 灭弧室采用纵缝或栅片两种形式	160A 与 630A 可用于 1140V 系统
	CJ40、CJ45	(1) 全系列采用塑料灭弧罩 (2) 灭弧室采用栅片式 (3) 具有 3 极和 4 极产品 (4) 附件多	

续表

类 型	型 号	结 构 特 点	备 注
交流电磁式	B	(1) 均为双断点直动式结构 (2) 采用 E 形铁心, 并用高弹性橡胶和片簧制成缓冲系统, 吸收碰撞能量 (3) 直流磁系统有两种: 交流叠片式铁心加上串联经济电阻的特制线圈; 直流软钢制铁心配上直流线圈 (4) 均为封闭式灭弧室, 电弧不易喷出 (5) 可配置积木式辅助触点、自锁继电器、延时器和机械联锁等附件	
	3TF	(1) 接触器为 E 形铁心、双断点直动式运动系统。接线端都有端子覆盖罩, 可防止人触及带电部位, 以确保使用安全 (2) 主电路、辅助电路均为双断点结构, 并用银基合金制成触点。辅助触点可直接装于整体结构中, 也可附于接触器整体两旁。采用封闭式灭弧室 (3) 在 $I_N \leq 22A$ 接触器里没有电弧板绝缘。在 $I_N \geq 32A$ 的接触器里有带有电弧绝缘板的模制电弧斜槽	
	LC1-D、d	(1) 双断点直动式结构, 正装立体布置 (2) 可配置积木式辅助触点组、空气延时头、机械联锁机构等附件, 并可与热继电器直接插接安装	
	CJ12	(1) 单断点转动式结构, 条架式平面布置 (2) 采用 II 型铁心, 动、静铁心均装有后座式缓冲装置 (3) 主触头由紫铜制成 (4) 灭弧系统有多纵缝、栅片和磁吹或其组合	可派生为多极式、灭磁式或锁扣式接触器
真空接触器	CJK	(1) 400A 及以下等级采用真空灭弧室与磁系统成前后立体布置的结构, 磁系统通过绝缘摇臂带动触点作轴向运动, 并采用钨基镶梯、钼合金触点 (2) 600A 等级采取平面布置方式, 磁系统通过方轴、支持件带动灭弧室的导电杆作上下垂直运动 (3) 采用拍合式直流电磁系统、双线圈结构, 交流电源通过接触器自备的整流桥对线圈供电, 允许在交流侧进行操作	
切换电容器接触器	CJ16、CJ19	(1) 直动式双断点结构, 触点在上部, 分上、下两层布置, 每一极主触点由两或三对动合触点并联而成, 闭合时, 其中一对先接通, 并串入限流电阻元件, 以抑制接通电容的涌流, 然后其他并联触点将限流电阻元件短接 (2) 辅助触点可以是一对或两对, 动合或动断, 可任意选定	
直流接触器	CZ0	(1) 电磁铁采用直流拍合式, 且衔铁沿棱角转动, 结构简单, 摩擦小 (2) 大容量触头采用单断点式, 小容量采用双断点式 (3) 采用串联磁吹线圈和双纵缝陶土灭弧室或横隔板式陶土灭弧室, 熄灭直流电弧能力较强, 适合于频繁操作	
	CZ18	(1) 立体布置的整体结构 (2) 单绕组线圈 (3) 带两对辅助触点 (4) 电磁系统带电, 须安装绝缘底板 其余结构与 CZ0 系列类似	

3 起动器的结构型式及组成部件

3.1 电动机的起动方式

3.1.1 绕线转子异步电动机的起动

通过转子回路中电阻的通断就能降低接通电流, 并能在零至极限力矩范围内控制起动力矩。绕线转子异步电动机的电阻起动可分为:

- (1) 半载起动。平均转矩为 0.65~0.7 倍额定转矩 (例如: 电梯)。
- (2) 满载起动。平均转矩为 1.3~1.5 倍额定转矩 (例如: 压力机和车床)。
- (3) 重载起动。平均转矩为 1.7~2 倍额定转矩 (例如: 离心泵、岩石粉碎机)。

在起重设备中, 大多使用的是绕线转子异步电动机。在这种使用场合下, 应采用 IEC 60947-4-1 规定的 AC-2 使用类别。AC-2 工作制是满载绕线转子异步电动机在起动阶段起动与分断的典型负载, 也是反接制动以及可逆运行和点动运行时的典型负载。

典型的起重设备运行 (混合工作制) 时, 其负载是比较小的, 因为此时即使分断过程也出现在稳定的运行阶段, 但出现的均是局部负载。

3.1.2 笼型异步电动机的起动

- (1) 直接接通 (全压起动)。如果直接接通笼型三相交

流异步电动机, 则在接通电流峰值衰减后, 流过的是稳定的起动电流 I_{st} 。起动电流 I_{st} 的大小与负载力矩无关。而起动时间 t_{st} 却决定于负载力矩、整个传动装置的转动惯量以及加速力矩。如起动时间长, 就会出现重载起动。直接起动的推荐值如下:

- 1) 接通电流峰值 (最大值): $I_{max} = 2\sqrt{2}I_{st}$ 。
- 2) 起动电流 (有效值): $I_{st} = (4\sim 8.4) \times \text{额定电流}$ (在特殊情况下可达 13 倍额定电流)。
- 3) 空载电流: $I_0 = (0.95\sim 0.2) \times \text{额定电流}$ (随电动机制造等级提高而下降, 并随极数增加而上升)。
- 4) 起动时间 t_{st} 。在正常条件下 $t_{st} < 10s$ 。在重载起动时 $t_{st} > 10s$ (验证电动机发热是必要的)。

对于可逆运行的电动机来说, 会出现更高的接通电流峰值。

如在转子堵转的情况下接通电动机, 则电动机将达到它的最大起动电流 (堵转电流)。

电动机的起动电流可通过不同的措施来降低。

- (2) 星—三角降压起动。星—三角降压起动这种接线方案只能应用于三相交流异步电动机, 因为它的额定电压在三角形联结时是与电网额定电压相一致的, 而它的绕组端是另行接向端子板的。

凡通过降低电动机绕组上的电压实现起动的接线方案中, 转矩随电压降低而成平方地下降, 而电流随电压降低而呈线性下降。

三相异步交流电动机在星—三角起动时,由于电动机绕组的电压降低为原来的 $1/\sqrt{3}$,其起动电流仅为直接接通时的 $1/3$,电动机转矩也下降到原来的 $1/3$ 。

星—三角降压起动只适用于起动那些在起动过程中负载转矩一直保持很小的三相交流电动机。

(3) 不中断的星—三角接通。为了使从星形工作转换到三角形工作时出现的瞬态过程尽可能地短,可用第4台接触器(转换接触器)通过电源上的电阻来控制电动机绕组,便可实现无中断的转换,从而使电流峰值在转换过程中受到进一步的抑制。

(4) 通过单极电阻的电动机起动。单极电阻的电动机起动方式又称为短路转子软起动。通过一根进线上电阻所产生的电压降,使电动机出现不对称的电压,于是在电动机中除产生同向的转矩外,还出现逆向转矩,从而减小了全部转矩。这并不适用于起动电流,在两根不带电阻的进线中,起动电流甚至还高于三角形直接起动时。在起动后,应将电阻短接。

(5) 通过三极电阻的电动机起动。起动电流经电阻而产生电压降,其作用是使电动机以相应减低的端电压实现起动。起动电流是随电压降低而呈线性衰减,在一级起动时,电阻应设计得使起动电流限制在3倍的电动机额定电流值上。在两级起动时,起动电流应限制在1.5~2倍电动机额定电流值上,然而此时的起动转矩已非常小。

(6) 用起动变压器起动电动机(自耦降压起动)。电动机在起动过程中是以星形电路的形式接在变压器的抽头上,一般额定电压接在70%上。在这种情况下,起动转矩和起动电流降低到相当于直接起动时的49% ($M \propto U^2$)。其优点是电网在起动时降低了负载。此外,电动机并不需要如同星—三角电路时与6根进线相连接,而只需与3根进线相连接。

当电网情况鉴于起动电流过高而不允许直接接通时,采用带有接触器的起动变压器对空载或负载很小的电动机进行自动起动是十分合适的。

(7) 三相交流换向电路。三相交流换向电路用于可逆运行,电动机通过相的变换而快速改变旋转方向。在快速转换时,电动机绕组中还存在着剩余磁场和相当高的剩余电压,于是就会出现相当于 $0.7I_N$ 的附加峰值电流。

必须注意的是,在转换时要有足够长的通断间歇,以便断开的开关电器的电弧在接通的开关电器接通之前,确保熄灭。换向接触器为此必须通过动断辅助触头实现电气联锁。此外,它们也可实现机械联锁。机械联锁能避免在调试和受强力振动时因误操作而发生两台接触器同时接通的情况,并能防止相间短路。

(8) 变极三相交流异步电动机的控制。在频率恒定时,异步电动机的转速决定于它的极数。如果想使同一台电动机具有多种转速运行,则它的定子绕组应配置得使人们能以不同极数的电动机与电源相连接。

(9) 点动运行。点动运行可理解为一次或重复地短时接通电动机电源,为了实现只是很小的运动,需在起动过程中断开电动机电流。点动运行往往使用在例如机床的调整和载重电梯上。点动运行会引起触头的强烈烧损。因此,应按使用类别 AC-4 来选用电动机开关。

3.2 电磁起动器的结构型式

电磁起动器主要有开启式和保护式两种结构型式。

电磁起动器主要由接触器和过载保护继电器组成,需要时可加装操作按钮、信号灯、电流表、控制电路用转换开关、控制变压器、熔断器、延时继电器、接触器式继电器

(中间继电器)、瞬时电磁过载继电器、自动转换中的欠电流继电器、减压起动用自耦变压器和转子变阻式起动器用电阻器等元器件,组成直接起动器、减压起动器或综合起动器(保护式起动器)。将上述所需的元器件按照便于组装、接线、检修、维护和性能可靠等原则装于一底板上,就得到一个开启式起动器;将上述所需的元器件装于不同防护等级的外壳中,就是不同防护等级的保护式起动器。

3.3 过载保护继电器

过载保护继电器用来保护电气设备,如三相交流电动机和变压器,防止出现不允许的过热。电动机出现过热,可能是由于驱动轴的过载,也可能是由于网络中电压的不对称使耗用的电流也不对称,或者是由断相(电源进线处)以及转子堵转引起的。在出现这些情况时,电气设备通过过载保护继电器实现监控保护。

按双金属原理工作的反时限保护装置或电子式电器都可作为过载保护继电器。

3.3.1 带双金属片的过载继电器

(1) 热继电器的结构和工作原理。如图2.10-13所示为热继电器典型产品的外形图。

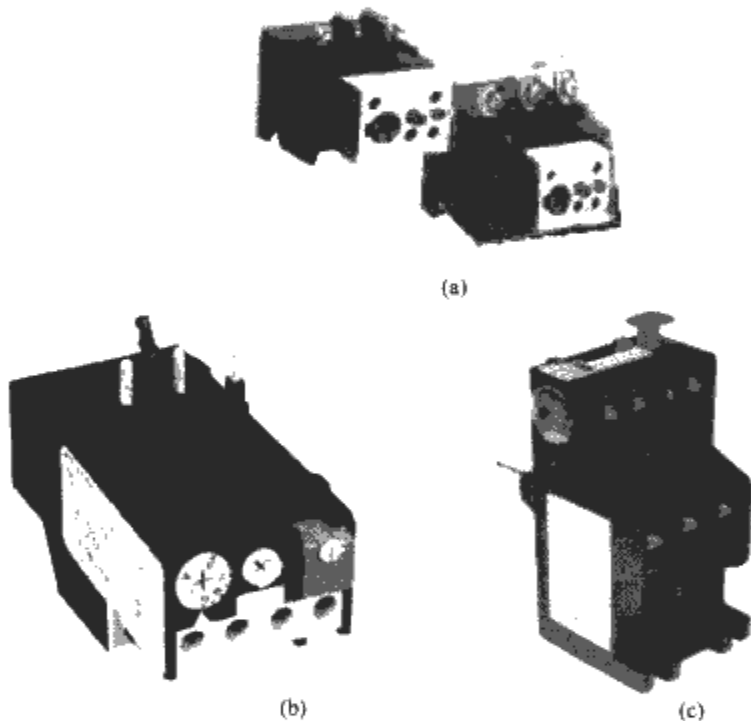


图 2.10-13 热继电器典型产品的外形图
(a) JR20 系列; (b) T 系列; (c) GR2 系列

带双金属片的过载继电器简称为“热继电器”,至少具有反时限热过载保护功能,也可具有断相保护、温度补偿、手动脱扣、手动复位及脱扣动作信号指示等功能。

热继电器的结构和工作原理如图2.10-14所示。

热继电器一般都带有3片双金属片。当发热绕组中流过电动机电流时,3片双金属就被加热、弯曲而使导板偏移。导板经补偿片和脱扣杆作用于摆动跷板。在未脱扣时,动断触头(95-96)是闭合着的,而动合触头(97-98)是断开的。

当发生过载时,脱扣杆不断被偏移,直至摆动跷板转换,使动断触头断开,动合触头闭合,并通过位置显示器发出脱扣状态指示信号。

当复位按钮处于手动复位位置时,摆动跷板就翻转到越过它的死点位置(防止重合闸机构)。

在双金属片足够冷却后,通过按动复位按钮,使摆动跷板又回复越过死点位置,从而实现继电器的复位。当复位按钮处于自动复位位置时,发生过载时虽然动断触头断开和动合触头闭合,但摆动跷板并不能摆动得越过它的死点位置。当双金属片冷却后,摆动跷板可自动地使继电器复位。

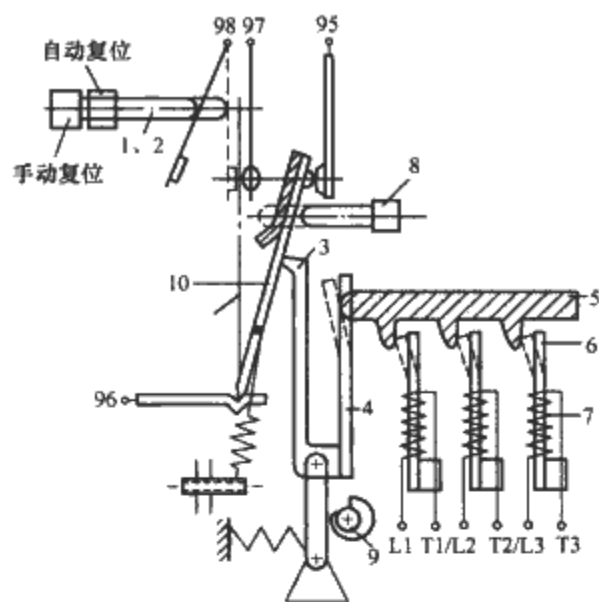


图 2.10-14 热继电器的结构和工作原理
1—手动自动复位调节；2—复位按钮；3—脱扣杆；4—温度补偿片；5—导板；6—双金属片；7—发热绕组；8—试验按钮；9—调节旋钮；10—摆动跷板

(2) 电流整定。热继电器装有调节旋钮，可以用来无级地在电流范围，即整定区域内将整定电流 I_r 调到规定的值。

此时，可将整定刻度调节到划线标记上或是将整定杆调到整定刻度上。带有互感器的过载继电器，当互感器与脱扣器分开放置时应整定到点状的标记上，这样就能补偿两种不同放置方式引起的不同发热影响。

(3) 重新投入工作备用状态的时间（复位时间）。热继电器在脱扣后需经历一定的时间，双金属片才能重新冷却。只有经过这段时间后，继电器才重新复位。这段时间被称为重新投入工作备用状态的时间。重新投运时间的长短决定于引起脱扣的电流大小以及过载继电器的脱扣特性曲线。

恢复投运时间迫使运行间歇，这有助于电动机获得冷却时间。

(4) 防止不必要的重新接通。为了防止不必要的重新接通，一些热继电器装有重合闸锁住机构（手动复位）。只有在按复位按钮后，辅助触头回复到其初始位置，才能接通所在控制回路的接触器。

重合闸锁住机构可用于手动复位和自动复位。通常出厂设定在手动复位的位置。

自动复位的过载继电器，考虑到安全的原因，只应用于按钮操作接触器的电路。

为了实现相隔距离较大的过载继电器的远动复位，可以提供远动复位电气元件，它可卡装在过载继电器上。

(5) 试验功能。用试验按钮可模拟继电器脱扣，使动断触头断开而动合触头闭合。

在手动复位位置上，操动试验按钮后，热继电器滞留断开状态，必须用复位按钮才能使热继电器重新复位。而在自动复位位置上，当松开试验按钮时立即进行自动复位。

(6) 脱扣特性曲线。脱扣特性曲线反映了脱扣时间与脱扣电流（以整定电流的倍数表示）之间的关系。

(7) 单极负载。如果单相交流或直流用电设备是用热继电器保护，则热继电器的所有 3 片双金属都必须被加热（串联使用）。

(8) 工作发热特性。在运行过程中，正常发热的电动机的热量裕度与冷态电动机相比是降低的。过载继电器特性应考虑到脱扣时间将减少这一状况。

(9) 脱扣时间的离散。制造公差、材料特性差异与校正误差都是引起脱扣时间离散的原因。因此，脱扣离散带与整

定范围是相匹配的。一般在产品样本中，对每个整定范围都用表格的形式来表示在 3~8 倍整定电流时的脱扣时间，其离散率可达 $\pm 10\%$ 左右。因此，在电动机使用现场，需对电动机的实际工作电流进行测量后，再对整定电流进行调整。

(10) 温度补偿。温度补偿用来降低周围温度对脱扣特性的影响。过载继电器补偿片的作用是在 $(-25 \sim 55)^\circ\text{C}$ 温度范围内，使继电器的极限脱扣电流总是处于标准所要求的范围之内。

(11) 断相敏感性（断相保护）。三相热继电器的脱扣特性曲线只在所有 3 片双金属同时通以相同负载电流时才有效。如有一根相线中断而只有两片双金属被加热时，则这两片双金属就应单独地具有操作脱扣机构所需的力。这就需要较高的电流或引起较长的脱扣时间。如果电动机以这种较高的电流，较长时间的负载运行，则必然会导致损坏。为了在电网不对称和断相时也能确保电动机的热过载保护，过载继电器应具有附加的断相敏感性。

具有断相敏感性的过载继电器装有差动导板。两块导板用一根杠杆灵活地相互连接。当出现断相时，断相的主片（冷片）冷却而后弯，其余继续通电的两相主片（热片）受热而前弯，将一前一后地推动差动机构中的两个推杆（导板）。通过杠杆传动比，可加速运动进入脱扣位置。

3.3.2 电子式过载继电器

电子式过载继电器（又称电动机保护器），是近年来计算机技术发展、微处理器进入电动机保护领域带来的产物。

(1) 电子式过载继电器的结构和工作原理。如图 2.10-15 所示为电子式过载继电器结构原理框图。电动机每一相电流通过电流互感器转换成相应的电压，这一电压与整定值成比例的电压相比较后，通过整流和模拟量到数字量转换（A/D 转换），输入到微处理器进行处理，微处理器对电动机的瞬时电流值不断进行计算和存储，并与故障动作条件进行比较。故障动作条件包括：电动机的脱扣级别、过载、断相、三相不平衡、堵转、阻塞、温度过高、剩余电流保护等。所有故障动作条件都存储在状态存储器中，即使断电这一信息也不会丢失。当电动机发生故障并且达到了故障动作条件，继电器动作，使输出触点转换，并输出动作指示。

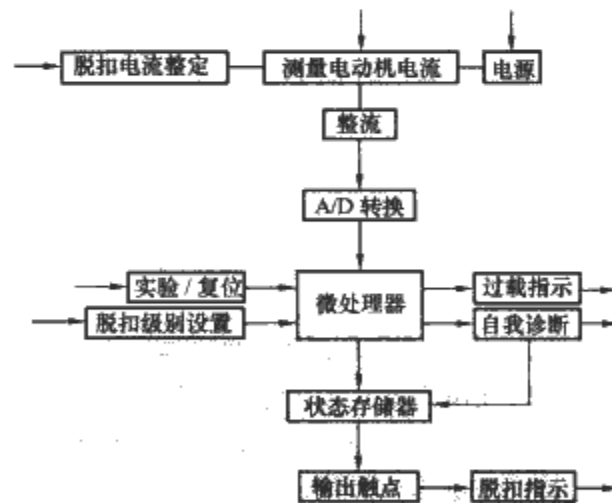


图 2.10-15 电子式过载继电器结构原理框图

(2) 电子式过载继电器的优点。与传统的热过载继电器相比，电子式过载继电器具有一系列优点：

1) 可保护重载起动的电动机。重载起动的电动机起动时间长，会使传统的热过载继电器发生误动作。热过载继电器的脱扣级别一般在 10A，要设计脱扣级别超过 10A 的热过载继电器则较困难且成本大幅度提高，而电子式过载继电器一般脱扣级别在 10A，10，15，20，25，30 甚至 50 之间可调节。

2) 具有很高的动作准确性。采用数字化技术，电子式过载继电器具有很高的动作准确性，因而能保证电动机的保

护处于最佳状态。

3) 整定值调节范围宽。电子式过载继电器的调整范围较宽,传统的热过载继电器调节范围一般为 1:1.5 倍,而电子式过载继电器可达 1:5 倍,这有利于生产和使用。

4) 功能大为增强。电子式过载继电器除作过载、断相保护外,还可实现三相电流不平衡、堵转、阻塞、温度保护、剩余电流等多种保护功能。

5) 工作可靠性高。采用自我诊断系统也使电子式过载继电器的工作可靠性大大提高。

3.4 起动器的外壳

起动器分为开启式和保护式两种。为了保护起动器组成元器件不受外部环境的损害,保护其工作正常,按规程规定,开启式起动器只能安装在专业人员才能接近的工作地

点,除非有特殊的措施,不能安装在一般人员能接近的工作地点。在大多数地点必须使用带有外壳的保护式起动器。起动器的外壳应牢固可靠、工艺性好和外形美观,而且不同的使用地点应有不同防护等级的外壳。

3.5 起动器的附件

除了接触器、过载继电器等主要元器件外,根据对起动器功能的不同需求,还需要加装信号灯、电流表、控制电路用转换开关、控制变压器、熔断器、延时继电器、接触器式继电器、瞬时电磁过载继电器、自动转换中的欠电流继电器、减压起动用自耦变压器和转子变阻式起动器用电阻器等元器件。

3.6 起动器的起动特性比较

各种常用起动器的起动特性比较见表 2.10-5。

表 2.10-5 常用起动器起动特性比较

项 目		直 接 起动器	减 压 起 动										延边星— 三角起 动器
			星—三角 起动器	电抗减压起动器			电阻减压起动器			自耦减压起动器			
				抽头			抽头			抽头			
				50%	65%	80%	50%	65%	80%	50%	65%	80%	
起 动 特 征	起动时电动机端电压	U	$0.58U$ (相电压)	$0.5U$	$0.65U$	$0.8U$	$0.5U$	$0.65U$	$0.8U$	$0.5U$	$0.65U$	$0.8U$	$0.7U\sim 0.8U$
	电动时电动机电流	I	$0.33I$	$0.5I$	$0.65I$	$0.8I$	$0.5I$	$0.65I$	$0.8I$	$0.5I$	$0.65I$	$0.8I$	$0.7I$
	起动转矩	T	$0.33T$	$0.25T$	$0.42T$	$0.64T$	$0.25T$	$0.42T$	$0.64T$	$0.25T$	$0.42T$	$0.64T$	$0.49T$
优 缺 点 比 较	起动时电动机端电压	恒定	恒定	随速度增加而较快加大			随速度增加而稍加大			不变			恒定
	电动时电动机电流	最大	小	在相同的起动电流下起动 转矩较自耦减压起动器小			在相同的起动电流下起动 转矩较自耦减压起动器小			即使起动电流较小也能 获得较大的起动转矩			中等
	起动转矩	最大	小										较小
	起动对电源电压的影响	最大	小	一般			一般			较小			较小
	起动时对机构的冲击	最大	小	较小			较小			较小			较小
	起动过程中力矩变化情况	得到充分 加速力矩	力矩增加不大	力矩增加较快			随速度增加而稍加大			力矩有增加			力矩有增加
	最大转矩	大	较小	较大			一般			一般			一般
	电动机 起动时间	最短	较长	较短			较长			较短			较短
	线路复杂性	最简单	简单	较复杂			较复杂			最复杂			复杂
	价格	最便宜	便宜	较贵			较贵			最贵			一般

4 主要技术参数与性能

4.1 接触器的技术参数与性能

4.1.1 额定值

额定值主要包括:

- 1) 额定绝缘电压 (U_i)。
- 2) 额定工作电压 (U_e)。
- 3) 额定冲击耐受电压 (U_{imp})。
- 4) 额定工作电流 (I_e)。
- 5) 约定自由空气发热电流 (I_{th})。
- 6) 额定工作制。
- 7) 使用类别。
- 8) 额定频率。
- 9) 控制电路电压 (U_c) 和控制电源电压 (U_s)。

4.1.2 主要性能

性能主要包括:

- 1) 动作特性。
- 2) 介电性能。

- 3) 温升性能。
- 4) 机械寿命。
- 5) 电寿命。
- 6) 额定接通与分断能力。
- 7) 约定操作性能。
- 8) 短时耐受过载电流能力。
- 9) 与短路保护电器 SCPD 的协调配合。
- 10) 外壳防护等级。
- 11) 抗冲击与振动。
- 12) 接线端子强度与接线能力。

4.1.3 接触器典型产品主要参数与性能

(1) 交流接触器。

1) 典型产品。目前,国内市场上的交流接触器主要是电磁式的交流接触器,某些特定场合如煤矿、化工领域则采用真空接触器。应用广泛的交流接触器产品中,我国自行设计的主要有 CJ20、CJ40、CJ45 等产品;国外的产品主要有施耐德公司的 LCI-D、d 系列、SIEMENS 公司的 3TB、3TF、3RT 系列、ABB 公司的 B、A 系列,金钟—默勒公司的 DIL-M 系列等。

国内企业比较有影响的有常熟开关制造有限公司(常熟

开关厂)、上海人民电器厂、杭州之江开关厂、厦门宏美电子有限公司、天津百利电器制造有限公司、正泰集团公司、德力西集团公司、环宇集团公司、天正集团公司等;国外进入我国市场有影响力的公司有 SIEMENS 公司、ABB 公司、施耐德公司、金钟—默勒公司等。

2) 国内自主研发产品情况。正泰作为国内低压电器的龙头企业,产品种类众多,仅接触器就有好几个系列。一方面几乎包括了国内统一设计、引进消化吸收的全部产品系列;另一方面公司自主开发的产品也呈现出越来越强的势头,如 NC8 系列交流接触器,具有模块化、附件多、派生

种类多、防护等级高等诸多优点。
厦门宏美电子有限公司自主研发了 XMC0 系列暖通空调专用交流接触器和 XMC2 系列交流接触器。XMC2 系列交流接触器具有高寿命、高可靠性、低功耗、耐高环境温度、抗高冲击振动能力、材料全部环保且可回收(符合欧盟 RoHS 和 WEEE 两环保指令)等优点。XMC0 系列暖通空调专用交流接触器具有比国外同类产品更好的封闭性、更紧凑的结构和高可靠性。
表 2.10-6~表 2.10-9 列出了 CJ20、CJ40、CJ45、3TF 系列交流接触器详细的技术性能参数。

表 2.10-6

CJ20 系列交流接触器基本参数

基本规格	U_i (V)	U_{imp} (kV)	U_e (V)	I_{th} (A)	断续周期工作制下的 I_e (A)				AC-3 的 P_e (kW)	不间断工作制的 I_e (A)
					AC-1	AC-2	AC-3	AC-4		
6.3	690	8	220	10	10	—	6.3	6.3	1.5	10
			380			—			2.2	
			660			—	3.6	3.6	3	
10			220	10	10	—	10	10	2.2	10
			380			—			4	
			660			—	5.2	5.2		
16			220	16	16	—	16	16	4.5	16
			380			—			7.5	
			660			—	13	13	11	
25			220	32	32	—	25	25	5.5	32
			380			—			11	
			660			—	14.5	14.5	13	
32			220	32	32	—	32	32	7.5	32
			380			—			15	
			660			—	18.5	18.5		
40			220	55	55	—	40	40	11	55
			380			—			22	
			660			—	25	25		
63			220	80	80	63	63	63	18	80
			380			40			30	
			660			40	40	40	35	
100			220	125	125	100	100	100	28	125
			380			63			50	
			660			63	63	63		
160			220	200	200	160	160	160	48	200
			380			100			85	
			660			100	100	80		
250			220	315	315	250	250	250	80	315
			380			200			132	
			250/06			660	200	200	160	
400			220	400	400	400	400	400	115	400
			380			250			200	
			660			250	250	200	220	
630	690	8	220	630	630	630	630	500	175	630
			380						400	
630/06			660	400	400	400	400	320	350	400
160/11	1140	12	1140	200	200	80	80	80	85	200
630/11			1140	400	400	400	400	320	400	400

表 2.10-7

CJ40 系列交流接触器基本参数

基本规格	框架代号	U_i (V)	U_{imp} (kV)	U_e (V)	I_{th} (A)	断续周期工作制下的 I_e (A)				AC-3 的 P_e (kW)	不间断工作制的 I_e (A)
						AC-1	AC-2	AC-3	AC-4		
9	12	690	8	220	20	20	9	9	3.5	2.2	20
				380			9	9	3.5	4	
				660			9	9	3.5	7.5	
12				220			12	12	4.5	3	
				380			12	12	4.5	5.5	
				660			9	9	4.5	7.5	

续表

基本规格	框架代号	U_i (V)	U_{imp} (kV)	U_e (V)	I_{th} (A)	断续周期工作制下的 I_e (A)				AC-3 的 P_e (kW)	不间断工 作制下的 I_e (A)						
						AC-1	AC-2	AC-3	AC-4								
16	25	690	8	220	32	32	16	16	8	4	32						
25				380			16	16	8	7.5							
				660			14	14	7	13							
				220			25	25	9	7.5							
				380			25	25	9	11							
				660			14	14	7	13							
	32	50	690	8	220	60	60	32	32	16	7.5	60					
380	32				32			16	15								
660	25				25			12.5	25								
220	40				40			20	11								
380	40				40			20	18.5								
660	25				25			12.5	25								
40	220				50			50	25	15							
50	380				50			50	25	25							
	660				25			25	12.5	25							
	63	125	690	8	220	80	80	63	63	63	18.5	80					
380	63				63			63	30								
660	63				63			63	55								
220	80				80			80	22								
380	80				80			80	37								
660	63				63			63	55								
80	125				125	220	100	100	100	30	125						
						380	100	100	100	45							
						660	80	80	80	75							
220						125	125	125	37								
380						125	125	110	55								
660						80	80	80	75								
100	250	690	8	220	250	250	160	160	160	45	250						
380				160			160	160	75								
660				125			125	125	110								
220				200			200	200	55								
380				200			200	200	90								
660				125			125	125	110								
200				220			250	250	250	75							
				380			250	250	225	132							
				660			125	125	125	110							
250				500			690	8	220	500		500	315	315	315	90	500
									380				315	315	250	160	
									660				315	315	250	300	
220	400	400	400		110												
380	400	400	315		220												
660	315	315	315		300												
400	220	500	500		500	150											
	380	500	500		400	280											
	660	315	315		315	300											
500	1000	690	8		220	800			800		630		630	630	200	800	
					380						630		630	500	335		
					660						500		500	500	475		
800				800	800	800	800	250	800								
					380	800	800	630		450							
					660	500	500	500		475							
1000	1000	—	1000	—	360	1000											
		—	1000	—	625												
		—	500	—	475												
125/11	暂空	1140	12	1140	暂空												
250/11				1140													
500/11				1140													
1000/11	1000			1140	1000	1000	—	400	—	600	1000						

表 2.10-8 CJ45 系列交流接触器基本参数

基本规格	U_i (V)	U_{imp} (V)	I_{th} (A)	U_e (V)	断续周期工作下的 I_e (A)		AC-3 的 P_e (kW)
					AC-2 或 AC-3	AC-4	
6.3	690	8000	10	220/230	6.3	5	1.7
				380/400			3
				660/690	3.5	2.8	3

续表

基本规格	U_i (V)	U_{imp} (V)	I_{th} (A)	U_e (V)	断续周期工作下的 I_e (A)		AC-3 的 P_e (kW)	
					AC-2 或 AC-3	AC-4		
9	690	8000	20	220/230	9	6.3	2.2	
				380/400			4	
				660/690			5.5	
12				20	220/230	12	9	3.0
					380/400			5.5
					660/690			7.5
16			30	220/230	16	12	4	
				380/400			7.5	
				660/690			11	
25				30	220/230	25	16	6.1
					380/400			11
					660/690			11
32			45	220/230	32	25	8.5	
				380/400			15	
				660/690			18.5	
40				45	220/230	40	32	11
					380/400			18.5
					660/690			18.5
45			70	220/230	45	40	15	
				380/400			22	
				660/690			30	
63				70	220/230	63	45	18.5
					380/400			30
					660/690			30
75			95	220/230	75	63	22	
				380/400			37	
				660/690			55	
95				95	220/230	95	75	22
					380/400			45
					660/690			55
110			140	220/230	110	86	37	
				380/400		85	55	
				660/690		60	100	
140				140	220/230	140	100	43
					380/400		104	75
					660/690		96	100
170			205	220/230	170	150	55	
				380/400		140	90	
				660/690		100	156	
205				205	220/230	205	176	64
					380/400		160	100
					660/690		170	122
250			300	220/230	250	250	78	
				380/400		230	132	
				660/690		160	235	
300				300	220/230	300	250	93
					380/400		230	160
					660/690		250	160
400			400	220/230	400	300	125	
				380/400		270	200	
				660/690		190	375	
475			475	220/230	475	300	145	
				380/400		270	250	
				660/690		400	190	375
630			630	220/230	630	570	191	
				380/400		520	335	
				660/690		362	573	
800			800	220/230	800	570	250	
				380/400		520	450	
				660/690		362	750	

表 2. 10-9 3TF 系列交流接触器基本参数

基本规格	U _i (V)	I _{th} (A)	U _e (V)	断续周期工作 下的 I _e (A)	P _e (kW)	
				AC-3	AC-3	AC-4
3TF40	690~1000	20	380	9	4	1.4
			660	7	5.5	2.4
3TF41		20	380	12	5.5	1.9
			660	8.5	7.5	3.3
3TF42		30	380	16	7.5	3.5
			660	12.5	11	6
3TF43		30	380	22	10	4
			660	16.5	15	6.6
3TF44		55	380	32	15	7.5
			660	24	22	13
3TF45		55	380	86	18.5	9
			660	24	22	15.5
3TF46		80	380	45	22	12
			660	40	37	20.8
3TF47		80	380	63	30	14
			660	60	55	24.3
3TF48		100	380	75	37	17
			660	60	55	29.5
3TF49		100	380	85	45	21
			660	80	75	36
3TF50		160	380	110	55	27
			660	95	90	46.9
3TF51		160	380	140	75	35
			660	120	110	60
3TF52		200	380	170	90	38
			660	160	150	66
3TF53		210	380	205	110	50
			660	160	160	86
3TF54		300	380	250	132	58
			660	230	220	100
3TF55		300	380	300	160	66
			660	260	250	114
3TF56		400	380	400	220	81
			660	380	335	140
3TF58		630	380	630	335	160
			660	660	500	278

(2) 直流接触器。

国内外部分厂商的典型直流接触器产品的主要性能比较见表 2. 10-10。

(3) 特殊接触器。

1) 暖通空调及制冷设备专用接触器。暖通空调及制冷设备专用接触器(Definite Purpose Contactor)是从美国发展起来的一类专用接触器, 现已广泛用于世界各国的暖通空调(HVAC)及制冷设备中, 还大量用于起重机、电焊机、食品加工机械等重负载或恶劣环境使用场所。这类产品的性能要求主要由美国空调制冷行业协会(Air-conditioning & Refrigeration Institute, ARI)的 ARI780/790 标准规定。其安装孔尺寸已经基本上达到统一, 便于实现不同厂家产品的互换。国内

近几年也开始按照美国标准要求开发这类产品。国内外典型的暖通空调及制冷设备专用接触器的主要性能比较见表 2. 10-11。

2) 微型接触器。微型接触器是一类通常用于控制小功率电动机如灯负载、电磁铁、变压器及加热设备等电气负载的机电开关。其主要特点是性能优越、结构紧凑和体积小, 因此, 它特别适用于安装空间小的控制电路中, 例如小型机床、空调、自动卷闸门、照明器具、工业洗涤设备等。微型接触器一般有螺钉接线、弹簧夹卡线、快速插接端子、印制电路板焊脚等四种接线方式。国内外典型的微型接触器的主要性能比较见表 2. 10-12。

表 2. 10-10 典型直流接触器产品的主要性能比较

生产企业	型 号	I _e (A)	操作频率 (次/h)	电寿命 (×10 ⁴ 次)	机械寿命 (×10 ⁴ 次)
SIEMENS	3TC	32~400	250~270	根据使用条件计算	1000
正泰、德力西	CZ0	40~600	600~1200	30~50	300~500
正泰、德力西	CZ18	40~630	600~1200	30~50	300~500

表 2. 10-11 典型暖通空调及制冷设备专用接触器的主要性能比较

生产企业	型 号	额定电流 (A)	周围空气温度 (℃)	电寿命 (×10 ⁴ 次)	机械寿命 (×10 ⁴ 次)
厦门宏美	XMC0	20~120	70	25	300
GE (美国)	CR453	20~150	65.6	20	50
Furnas (SIEMENS)	Class 45/Class 42	20~150	65.6	20	50
Products Unlimited (Tyco)	3100	20~120	65.6	20	50
Culter-Hammer (Eaton)	C25N	20~120	65.6	20	50

表 2. 10-12 典型微型接触器的主要性能比较

生产企业	型 号	I_e (A)	电寿命 (×10 ⁴ 次)	机械寿命 (×10 ⁴ 次)
厦门宏美	XMC1	6~12	50	300
ABB	B6/B7	6~9	40	50
TE (Schneider)	LC1K	6~12	30	50
LGS	GMC	6~16	100	1200
LOVATO (美国)	BG	6~12	50	2000

3) 分合电容器组专用接触器。分合电容器组专用接触器能够限制在接通电容器组时产生的浪涌电流。为了节省开发成本,接触器生产厂家一般会在已有的通用接触器基体上派生分合电容器组专用系列接触器产品,即通过并联串有小

开距触点和电阻(或电感)支路,在接触器闭合时该支路先接通,从而有效限制接通浪涌电流。国内外典型的分合电容器组专用接触器的主要性能比较见表 2. 10-13。

表 2. 10-13 典型分合电容器组专用接触器的主要性能比较

生产企业	型 号	I_e (A)	额定控制容量 (kvar)	备 注
长征电器	CJ23	16~40	7.5~30	在 CJ20 系列接触器上派生
ABB	UA	16~75	7.5~60	在 A 系列接触器上派生
TE (Schneider)	LC1D·K	16~63	7.5~40	在 LC1-D 系列接触器上派生
SIEMENS	3RT16	18~72	7.5~60	在 3TF 系列接触器上派生

4. 2 起动器的技术参数与性能

起动器的接通分断能力、寿命、动作特性、介电性能和与短路保护电器的协调配合等技术性能要求与接触器要求基本相同,并补充说明以下几点。

4. 2. 1 起动器的保护特性

- 电动机工作时经常可碰到下列不同情况的热过载:
- (1) 由于不正常的机械负载及线路电压、频率偏移额定值使电动机电流大于额定值。
 - (2) 间断周期工作频率过高、频繁起动和停止电动机,使电流均方根值超过额定值。
 - (3) 机械负载过大,使电动机不能起动,流过起动电流时间过长。
 - (4) 断相后使电动机不能起动,或运转中断相后使绕组电流加大。
 - (5) 安装地点海拔高,冷却介质温度高,电动机冷却功能失效,使电动机绕组温升过高。
- 电动机过载时,会缩短使用寿命,严重时损坏其绝缘,因此起动器应对电动机的过载进行有效保护。用于电动机过载保护的装置分为采用双金属片原理和电子装置两种(见 3. 3)。对起动器保护特性的补充规定主要包括:
- (1) 过载继电器各极通电时的动作范围。

- (2) 三极过载继电器两极通电时动作范围。
- (3) 瞬时电磁过载继电器的动作极限值。
- (4) 自动转换中的欠电流继电器的动作性能。

4. 2. 2 起动器的脱扣级别

组成起动器的反时限过载继电器从冷态开始,在规定的负载下,规定了最大的脱扣时间。脱扣级别(脱扣级别 10A, 10, 20, 30)是表示冷态起动允许最大的脱扣时间,单位为 s。

脱扣级别 10A 级和 10 级过载继电器用于正常起动,20 级和 30 级过载继电器用于较长的起动时间(重载起动)。

4. 2. 3 起动器典型产品主要参数与性能

- (1) 电磁起动器。电磁起动器中的保护装置,目前普遍采用的仍是热过载继电器。电磁起动器已趋成熟,以往的发展重点是如何提高操作频率和使用寿命。而现在则主要是提高绝缘可靠性,使之具有可靠的通断能力,并有足够的裕量,使之在功能上具有柔性以及使用方便性等。
- 表 2. 10-14 对比分析了国内外部分厂商的起动器产品的主要性能、参数、特性等。
- (2) 电子式起动器。电子式起动器中的保护装置,主要采用的是电子式过载继电器。典型电子式过载继电器的主要性能比较见表 2. 10-15。

表 2. 10-14 典型起动器的主要性能比较

生产企业	起动器型号	接触器型号	热继电器（或电动机保护断路器）型号	整定电流范围（A）
正泰、德力西	QC25	CJ20	JR20	0.1~630
Rockwell（AB）	109-C	100-C	193-T	0.6~90
SIEMENS	SIRIUS	3TF	3VU/3RV	0.6~100
ABB	B••S	B	T	0.1~500
Schneider（TE）	D	LC1-D	LR1-D	0.1~93

表 2. 10-15 典型电子式过载继电器的主要性能比较

生产企业	型号	整定电流范围（A）	脱扣级别	保护功能
上海电器科学研究所	VDT1	1.6~1600	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40	过载、断相、电流不平衡、堵转、阻塞、接地、起动超时等
苏州万龙	ST500	1~250	10, 10, 20, 30	过载、断相、电流不平衡、堵转、阻塞、接地、起动超时等
SIEMENS	3UF5	0.25~820	5, 10, 15, 20, 25, 30	过载、断相、电流不平衡、堵转、阻塞、接地、起动超时等
金钟—默勒	ZEV	1~820	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40	过载、断相、电流不平衡、接地

5 设计要点

5.1 电磁接触器的设计要点

到目前为止，接触器的设计计算方法还不能准确地达到我们预期的目的，这是因为接触器的工作大多是动态过程，大多数情况下是过渡过程，如电弧的开断、电磁作用力、接触电阻等。再加上经济、技术指标要求的限制，不能只考虑理论计算上的最优。

5.1.1 总体结构布局

电磁接触器的总体结构主要有转动式和直动式两大类。转动式结构又分为单断点和双断点两种型式；而转动式双断点现在已经很少采用，转动式单断点结构由于可以实现快速分断和磁吹灭弧，分断能力高，多用于在超大电流（超过1000A）接触器。直动式结构都是双断点型式，又分为正装直动式和倒装直动式两种型式，在1000A以下接触器中得到广泛应用。

5.1.2 触头系统设计要点

对触头系统的要求：

（1）触头系统应满足下列要求。

- 1) 小电流时接触可靠性高。
- 2) 接触电阻低，压降小，长期通以额定工作电流时温升稳定而且低。
- 3) 抗熔焊，具有足够的过载能力。
- 4) 接通时触头振动时间短，电弧作用下触头磨损少，接通分断时触头机械磨损少，具有足够高的触头寿命。
- 5) 节约银及铜等贵重金属，安装维护方便。

（2）触头材料的选择。接触器触头的三种工作状态，对触头材料的要求有所不同，见表 2. 10-16。

表 2. 10-16 接触器触头材料的性能与三种工作状态的关系

工作状态	导通瞬间	接通状态	分断状态
材料性能			
电导率	++	++	+
热导率	++	++	+
耐腐蚀性（氧化）	++	—	○
机械硬度	—（冷态）	—（热态）	+

续表

工作状态	导通瞬间	接通状态	分断状态
材料性能			
抗拉强度	○	—（冷态）	+
熔点	○	+	+
相变潜热	○	+	+
生成和维持电弧的性能	○	—	—

注 +为有利；—为不利；○为无关或未知。

从表 2. 10-16 可见，触头材料的电导性和热导性是最主要的，机械硬度和抗拉强度也很重要。

银的抗电弧磨损性能好、载流能力较强、价格适中，故触头材料宜以银为基础，其缺点是易延展及生成和维持电弧的性能较强。

（3）触头参数的确定。触头参数的设计，应确定的内容包括：

- 1) 触头银合金用量的确定。
- 2) 触头压力和接触电阻。
- 3) 触头闭合力。
- 4) 触头几何尺寸及触头参数。
- 5) 触头开距。
- 6) 触头超程。

5.1.3 灭弧系统设计要点

（1）灭弧系统应满足下列要求。

- 1) 断开负载时过电压低，燃弧时间短。
- 2) 游离化气体体积、热电弧气体体积及灭弧罩体积小。
- 3) 电弧作用下灭弧罩及触头支持件及其他接触电弧的零件磨损少。
- 4) 电流过零后，触头间隙绝缘强度恢复快，能防止恢复电压击穿。分断电弧时，灭弧系统能吸收电弧中大部分能量。
- 5) 相间隔离良好，能防止相间飞弧短路及带电体对地飞弧。
- 6) 中、大容量接触器灭弧系统要保证电弧从触头转移到弧角的时间短，弧角及灭弧罩等零件应具有足够的寿命。
- 7) 灭弧时声光效应小。
- 8) 凝聚于触头附近绝缘零件上的银蒸气不易凝结成导

电膜。

9) 灭弧罩拆卸方便。

设计灭弧系统时,应考虑不同工作制下的灭弧能力和磨损情况。不同额定电流的交流接触器的灭弧系统是有所不同的。

(2) 接触器灭弧方法概述。

1) 小电流灭弧系统。额定电流为 20A 以下的交流接触器,应设计成在 AC-3 工作制下在电弧尚未被吹离触头前就已熄灭的结构。这样既简单又经济,不需要特制灭弧室,用一般绝缘材料隔开就行了。

2) 中电流灭弧系统。额定电流大于 20A 时,可加引弧片或利用回路电动力吹弧。利用触头断口来灭弧。其中,一个断口的消电离电压约为 350~420V。在三相 400V 电力系统中,第一个断口分断时,它所承受的暂态恢复电压为

$$u = \left(400 \times \sqrt{2} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \gamma \right) \text{V} \approx 490 \text{V}$$

式中: γ 为过振荡系数,一般可近似取为 1。

对于 400V 电力系统,适于采用双断点,故小容量交流接触器普遍采用双断点;对于 690V 交流电力系统,单纯用双断点灭弧是相当困难的。

3) 大电流灭弧系统。额定电流大于 80A 的交流接触器需要加装灭弧栅片。灭弧栅片有两个作用:①将电弧吸入栅片中;②将电弧分割成许多串联的短弧,以形成较大的电压降,使电弧熄灭。

(3) 单断点接触器的磁吹装置。为了避免电弧停滞在触头之间把触头烧坏,单断点接触器的每极一般装有一个磁吹装置,包括装在由铁板或电工纯铁做的铁心上的线圈(主电流流过)。这样感应磁力线在铁心中产生,并以铁心为磁路,在电弧生成的灭弧室区域,由两铁板围绕于绝缘板两侧,在铁板间有磁场。

(4) 双断点接触器的 U 形引弧件。在双断点的每极中,电弧移向灭弧室区域,电弧在磁场的作用下自行熄灭。该磁场是由电弧附近导体中的电流和围绕触头的磁铁片弯成的 U 形件作用而形成的。

(5) 金属去离子栅片式灭弧室的设计。双断点金属栅片灭弧室的设计,主要包括:

- 1) 金属栅片的数量。
- 2) 金属栅片的片间距离。
- 3) 金属栅片下沿的形状。
- 4) 灭弧栅内电弧的运动路径。
- 5) 金属栅片的厚度。
- 6) 金属栅片的长度。
- 7) 灭弧室的容积。
- 8) 金属栅片在灭弧室中的分布。

5.1.4 电磁系统设计要点

5.1.4.1 电磁系统设计要求

电磁系统主要由电磁铁和控制线圈组成。合理选择电磁系统的结构和参数是保证接触器工作可靠性和提高其技术经济指标的重要一环,对它的要求是:

- (1) 吸力特性应与反力特性良好配合。
- (2) 体积小、损耗低,节约原材料,特别是有色金属。
- (3) 寿命长。
- (4) 加工容易,维修方便。

5.1.4.2 反力特性参数的确定

- (1) 初始反力的确定。
- 1) 在断开位置时回弹距离应不使动断触头打开。

2) 接触器应能经受规定的冲击振动而不发生误动作。

(2) 吸力特性和反力特性的配合。由于合闸时线圈电流非周期分量的影响,交流磁系统静态和动态吸力特性之间存在很大差异,因此,所谓吸力特性和反力特性的配合实际上是指动态吸力特性和反力特性之间的配合。但由于影响动态特性的因素很多,特别是动态特性随合闸相角不同而不同,所以一般是以静态特性和反力特性良好配合为基础进行磁系统的初步优化设计,最后计算动态特性来校验。静态吸力特性与反力特性的配合要求在控制电源电压的下限值(85% U_N)时吸力特性高于反力特性,并与反力特性尽可能接近,以保证接触器在控制电源电压下限值时能可靠吸合,且吸合时的碰撞能量为最小。静态吸力特性与反力特性的配合主要考虑主触头刚接触位置,及完全打开位置。

要使吸力特性和反力特性良好配合,必须按已知反力特性合理选择磁系统的型式和正确决定电磁系统的参数。通常以触头刚闭合位置作为设计磁系统的参考点,若主触头刚接触位置特性已达到良好配合,而在起始位置吸力过大或过小时,可以用在保证允许最小初始反作用力的前提下,适当调整初始反力,或调整双 E 形、双 U 形或 T 形衔铁的肢长以改变螺管力的大小和改变杠杆比等办法来进行小范围的调整。为了减少碰撞能量,静态吸力特性与反力特性的配合在保证可靠吸合的前提下,允许触头在接触处有少量相交(见图 2.10-10)。

在磁系统静态吸力特性和反力特性良好配合的基础上,通过对接触器吸合和释放动态特性的计算和分析,对磁系统和反力特性参数的搭配适当调整,以保证在各相角下接触器的起动电压等于吸合电压、释放电压等于返回电压。

5.1.4.3 电磁系统参数的静态计算

以前,在产品设计中,磁系统设计中工作量最大的一般是磁路计算。要想找出一个比较好的设计方案,由于计算工作量太大几乎无法实现优化。现在使用了计算机辅助设计,对磁路设计进行优化选择,再加上可以进行动态特性的设计计算,所以可获得较优化方案。

通过磁系统的设计计算,可确定所设计产品的磁路和线圈。主要参数包括:

- (1) 线圈电流密度和电磁感应强度的选取。
- (2) 电磁系统的效率和接触器的保持功率(VA)。
- (3) 铁心的窗口面积。
- (4) 分磁环的计算。
- (5) 线圈形状的设计。

5.1.4.4 电磁系统的动态计算

上面的电磁系统计算,是把给定值固定在某点上,然后计算相应的有关值,这是静态计算。虽然采用了计算机辅助设计,使静态计算也能获得比较精确的结果,但接触器工作时是一个暂态的过渡过程,所以采用静态计算结果,必然会产生误差,因此国内外专家、学者都转向了动态计算的研究。采用动态计算,考虑到了接触器工作时是一个暂态过渡过程,计算结果给出这一工作过程各参数的变化曲线,能比较准确地反映接触器的工作过程,以此作为设计依据,或根据这些结果调整参数,将能获得更理想的设计效果。

5.1.4.5 提高电磁系统机械寿命的措施

通常,要求电磁系统在 85%~110%额定控制电源电压下能可靠吸合。由于实际工作中,电压经常高于 85%额定控制电压,所以电磁系统吸合时就会产生多余的能量,这部分多余能量被衔铁和其他运动部件以碰撞的方式消耗掉。当采用下列结构和材料时,可防止衔铁的迅速损坏:

(1) 铁心的硅钢片片间加油。在使用和寿命试验过程中,油从硅钢片间溢出,润滑铁心表面,减少铁心撞击时的磨损。

(2) 在结构设计时,碰撞部件不应有锐角。

(3) 分磁环镶装要牢靠,以防止疲劳断裂。

(4) 静铁心等部件用弹性悬挂结构(即迎击式),可减轻铁心碰撞时的应力和触头跳动。

5.1.4.6 分磁环设计

分磁环设计的重点是材料与参数选取合理、结构与镶装要牢靠,以防止发生下述的现象:

(1) 分磁环断裂,铁心发响。交流电磁系统中,电磁铁吸力是交变的,必须靠分磁环产生移相磁通,使合成吸力不过零,避免铁心产生振动噪声。由于分磁环受力复杂,环与轭铁固牢较为困难,一旦松动,分磁环很快会断裂,铁心就会产生严重噪声,不能正常工作。

(2) 温度变化使分磁环不能固牢。

(3) 移相磁通产生平均吸力要大,要求分磁环产生相移在 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 左右。分磁环电阻要求较小,因此分磁环内电流较大,致使分磁环长期处在高温下。磁系统不工作时,环温降至室温,温度变化较大。长期高温、低温反复变化,使分磁环热胀产生变形,冷缩后使分磁环不固牢。

(4) 冲击载荷使分磁环易断。动静铁心吸合时,静铁心和分磁环受到很大冲击力作用,使环反复承受剪切、弯曲应力作用而损坏。

5.1.4.7 电磁系统节能设计

与交流接触器电磁系统匹配使用的节能技术有很多种,包括:

(1) 电容器式。

(2) 变压器式。

(3) 电子式。

(4) 剩磁式。

(5) 永磁式。

(6) 机械锁扣式。

(7) 限流电阻式。

5.1.4.8 线圈浪涌抑制设计

为了抑制线圈浪涌过电压,采用下述线路元件与接触器线圈并联连接。

(1) RC元件(电阻与电容器串联)。

(2) 自振荡二极管。

(3) 压敏电阻或双向稳压管模块。

5.1.5 接触器可靠性设计

可靠性设计的主要内容包括以下几个方面。

5.1.5.1 触头抗熔焊

(1) 触头熔焊的原因。

1) 超载选用。由于现代接触器体积较小,当在AC-4类负载下使用时,需降容使用。在产品样本、使用说明书中有推荐数据,经常处在快速点动下工作的接触器,属于AC-4负载,必须降容使用,否则会发生触头熔焊。

2) 控制系统故障。当被控电动机处在起动状态时,如果控制接触器的线圈电路中的热保护动断触头产生抖动,接触器会产生反复的接通、分断。由于电动机起动电流较大,使得接触器短时通断大电流多次而导致触头熔焊。

3) 电网电压跌落。电网电压的正常工作范围是 $85\%\sim 110\%$ 额定电压,但由于较大负载投入电网时,往往引起电网电压瞬时跌落,据国际电网质量统计结果表明跌落值大多数在 70% 额定电压以上,个别地区有的跌落到 65% 额定电

压。如果当接触器投入电网正处在电网电压瞬时跌落,此时一般接触器就不能保证可靠吸合,接触器可能会发生抖动,使接触器主触头快速通断被控电动机的起动大电流而发生熔焊。

(2) 消除触头熔焊的方法。解决电压瞬时跌落时接触器投入电网造成主触头熔焊的方法如下:

1) 在控制电路中,设一门槛电路,当电网电压低于额定电压的 85% 时,起动接触器的命令不传给电磁系统,只有在电网电压不小于 85% 额定电压时,接触器线圈才能从门槛电路获得线圈起动电流,确保接触器无抖动吸合。

2) 扩大接触器操作电压范围实现宽电压工作。使其在额定电压的 65% 以上,均能确保接触器无抖动吸合。

5.1.5.2 线圈防断线和烧损

(1) 线圈易烧坏的原因。

1) 匝间短路。在交流线圈数千匝线圈中往往难免有一匝至几匝产生短路。在交变磁通作用下,感应电动势会在短路匝内引起很大的电流,使短路匝产生过热,并逐步影响相邻线圈,最终烧坏线圈。而在直流磁系统中,尽管也有短路匝,但因无交变磁通,故短路匝中不会产生感应电动势,不会出现像交流线圈中一样的匝间短路引起线圈烧坏的现象。

2) 温升过高。长期在额定电压下工作的线圈,允许工作温升与漆包线材料的耐热等级有关。如选用E级绝缘的漆包线材料,则允许温升为 100K 。国外一些著名电器厂商在努力改进线圈绕制工艺后,仍难保证线圈可靠工作。近几年已提高了漆包线耐热等级,选用F级甚至更高绝缘等级的漆包线。

3) 过电压。当接触器断电时线圈会产生高于线圈工作电压 $2\sim 3$ 倍甚至更高的反电动势,施加在线圈上,使线圈绝缘不断恶化,最终导致线圈绝缘劣化造成耐压击穿而损坏。

(2) 防线圈断线和烧损的方法。

1) 采用新型封固树脂。防止接触器通断时的振动对电磁系统中电子元件的影响,提高耐振强度,如将印制电路板组合件用树脂封固。

2) 减少线圈功耗。对于交流电磁系统,铁心闭合前,使输入励磁安匝数减少,以减少冲击、降低线圈功耗。

5.1.5.3 弹簧抗疲劳损坏

弹簧设计时,要使弹簧谐振频率避免为 100Hz 或其倍数,这是因为吸力的频率是 100Hz 。解决这个问题应限制弹簧的圈数,即应采用相同力、相同尺寸但圈数最少的设计方案。

5.1.5.4 触头接触可靠性设计

触头接触可靠性主要是取决于接触位置的状态与电压高低。在低电压与小电流时,不存在借助通断电弧使接触位置达到自净作用的现象。绝缘粒子和触头材料上外界层的污秽,给接触带来妨碍,甚至阻止接通。触头材料上形成的外界层一般是很薄的,只要几伏电压即可将其击穿(人们称这种现象为“熔烧”),因此,通常并不影响接触,但在电压较低且多个接触位置串联时,就不能排除偶尔会发生接触的不可靠。

对常用的机械式接触器来说,提高接触可靠性的主要途径有:

(1) 增大接触力。

(2) 选择合适的触头材料,如银或银的复合材料。

(3) 改进触头的造型(增大接触面积、网纹十字槽)。

(4) 动触头的滑移运动(但会增加磨损)。

- (5) 单断点取代双断点,通断位置应避免串接。
- (6) 电路的并联(双触桥、冗余度)。
- (7) 在电器的通断区域加装外壳。

5.2 电磁起动器的设计要点

电磁起动器设计主要包括以下几个方面:起动器的主要元器件选型设计、控制线路设计、外壳设计、起动器本体设计、起动器附件设计等。

起动器中接触器、热继电器与外装熔断器(有的内装)按下列要求进行分工协调:接触器作电动机主电路的遥控开关;热继电器作为电动机、电源电缆及接触器的过载保护;SCPD即熔断器或塑壳断路器(MCCB)作为接触器、热继电器、电动机及电源电缆的短路保护。组成起动器时,这些元器件的动作性能应按相关标准的规定进行匹配,应能满足下列要求:

- (1) 热继电器、熔断器的电流-时间特性应有足够的动作延时,以保证电动机的正常起动。
- (2) SCPD应保护热继电器不受大于 $10I_e$ 电流的破坏。
- (3) SCPD应能分断接触器不能分断的电流(大于8倍或10倍接触器的额定工作电流)。
- (4) 短路时,SCPD应能保护接触器使其能满足标准中有关与SCPD协调配合的要求。

除了接触器、热继电器等主要元器件外,根据起动器的功能不同尚需加装诸多辅助元器件(详见3.5)。这些元器件可根据要求选用标准产品。安装这些元器件需要加装安装零件。另外,有些专用的起动器附件,如接线端子、连接导线、操作手柄、防护式起动器用密封垫、手动操动机构、失压脱扣器等,需要它们结构简单、工艺性好、性能可靠,并应考虑全系列通用等。

设计电磁起动器的线路时,要求接线简单、性能可靠。

5.2.1 热过载继电器设计要点

热过载继电器设计主要有以下方面:

- (1) 总体结构布置。总体结构布置是决定热过载继电器的检测机构与动作执行机构相互位置是并列式、上下式还是立体式,以便其动作性能易于达到准确、可靠和稳定等要求。
- (2) 热双金属系统的设计。热双金属系统的设计包括热双金属片的加热方式、双金属片与热元件的热耦合和双金属片的弯曲挠度计算等。
- (3) 温度补偿设计。温度补偿一般通过补偿双金属片来实现,温度补偿设计的主要内容是补偿双金属片的弯曲挠度计算。整定电流可调节的热过载继电器,热元件的最大值满足理想的温度补偿,在其余的整定电流下允许出现一定的欠补偿,但不能产生过补偿。
- (4) 触头与动作机构设计。在设计一个基本系列时,其动作机构,包括触头、电流调节、复位按钮、动作指示等,在各个等级产品中应尽可能通用。热过载继电器触头需快速动作,目前多为翻转速动型机构,有片簧和拉簧两种。片簧因其材质较薄又富于弹性,在加工和热处理时易变形,难于保证几何尺寸和脱扣力的要求;而拉簧制造工艺简单,但脱扣力调整困难,需设计相应的调整机构。

触头应尽量设计成电气上相互隔离的动合、动断转换形式。

- (5) 电流调节机构设计。现在多采用凸轮式电流调节机构,其零部件少,装配方便。
- (6) 动作指示与调整功能件的布置。电流调节、动作指

示、断开检验按钮等功能件的设计,应尽可能布置于同一个平面直观和醒目的地方,便于观察、监视和调整。

(7) 复位方式。自动或手动复位方式的转换,应设计成不需要拆卸产品和使用特殊工具即可方便地转换的结构形式。

5.2.2 电子式过载继电器设计要点

电子式过载继电器应进行以下设计:

- (1) 系统硬件设计内容。
 - 1) 电流检测电路,由电流互感器、A/D转换器和微处理器等组成的电路。
 - 2) 保护电路。
 - 3) 不同的脱扣级别可选择。
 - 4) 可实现电流整定值可调。
 - 5) 考虑手动复位和自动复位两种复位方式。
 - 6) 应具有面板故障指示。
- (2) 数学模型建立。
 - 1) 过载保护。过载动作时间特性是与电动机的热特性相配合的反时限特性。精确地模拟电动机运行过程中的热积累与散热是电子式过载继电器的技术难点。
 - 2) 断相及电流不平衡保护。断相原因主要有电动机外部电源缺相和电动机内部绕组断线两种,断相是三相电流不平衡的极端情况。
 - 3) 相序保护。通过判别三相电流的相序是否正常来实现,或在接通之前通过测量电压进行预先判断而在故障情况下阻止继电器的接通。
- (3) 系统软件设计。在软件设计过程中应充分考虑软件抗干扰技术,可采用指令冗余、软件陷阱及看门狗(WDT)电路有效提高软件的工作可靠性。

6 选用与维护

为了方便用户选用与维护,在接触器、起动器的样本、说明书中,按产品标准的要求,需规定以下内容(如有的话):

- (1) 额定工作电压。
- (2) 额定工作电压下的使用类别和额定工作电流(或额定工作功率)。
- (3) 额定频率(如AC 50Hz, AC 50/60Hz)和(或)直流。
- (4) 额定工作制,并标明断续周期工作制级别。
- (5) 额定通断能力,可用相应的使用类别代替。
- (6) 额定绝缘电压、额定冲击耐受电压。
- (7) 外壳防护等级。
- (8) 污染等级。
- (9) 额定限制短路电流、接触器和起动器的配合类型及SCPD的型式、电流额定值和特性。
- (10) 通断操作过电压。
- (11) 控制电路的额定控制电源电压(U_c)或额定控制电路电压(U_{c0})、电流性质和额定频率。
- (12) 辅助电路的额定值。
- (13) 过载继电器和脱扣器的特性。
- (14) 起动器的控制线路图、起动严酷度、起动时间、在抽头端子上的电压,安装和接线说明。
- (15) 安装使用点的最大允许海拔。
- (16) EMC性能的环境与接线等的特殊要求。

交流接触器的选用不仅和所通断的负载有关,和接触器所在回路的电力系统各阻抗参数有关,还和控制方式、使用

环境及使用要求有关，所以选择交流接触器时要全面考虑，逐步计算各参数数值，达到选用合理、使用方便。

6.1 接触器的选用

6.1.1 接触器一般用途与选用原则

(1) 电网条件和工作条件。接触器的额定电压值的规定包括如下几个：额定工作电压 U_e 、额定绝缘电压 U_i 或额定冲击耐受电压 U_{imp} 。其中额定工作电压 U_e 关系到工作制与使用类别，额定绝缘电压 U_i 或额定冲击耐受电压 U_{imp} 关系到接触器或附件与电气系统的绝缘配合。

对于三相交流系统来说，使用的是电网的三角形联结电压。一台开关电器可以有多个额定工作电压来与各个不同的特性参数（例如通断能力和寿命）相匹配。

低压交流开关电器通常都是按频率 40~60Hz 来设计的。随着频率的不同，其特性参数也可以是不同的。

(2) 用途与额定电流。用途或使用场合与使用类别相关，应按不同的使用类别来选用。

对应不同的额定工作制，如连续工作制、断续工作制或短时工作制，从发热特性来看，可分为以下额定电流：约定自由空气发热电流 I_{th} 或约定封闭发热电流 I_{the} ；额定工作电流 I_e ；额定持续电流 I_u 。

额定工作电流决定于开关电器的使用条件、额定工作电压、额定频率、通断能力、额定工作制、使用类别、触头寿命和防护型式。因此，一台开关电器可以有若干个不同的额定工作电流与其相匹配。

(3) 选用原则。接触器作为通断负载电源的设备，其选用应按满足被控制设备的要求进行，除额定工作电压与被控设备的额定工作电压相同外，被控设备的负载功率、使用类别、控制方式、操作频率、工作寿命、安装方式、安装尺寸以及经济性都是选择的依据。选用原则如下：

(1) 交流接触器的电压等级要和负载相同，选用的接触器类型要和负载相适应。

(2) 负载的计算电流要符合接触器的容量等级，即计算电流小于等于接触器的额定工作电流。接触器的接通电流大于负载的起动电流，分断电流大于负载运行时需要分断的电流。负载的计算电流要考虑实际工作环境和工况。对于起动时间长的负载，0.5h 峰值电流不能超过约定发热电流。

(3) 按短时的动、热稳定校验，线路的三相短路电流不应超过接触器允许的动、热稳定电流。当使用接触器断开短路电流时，还应校验接触器的分断能力。

(4) 接触器吸引线圈的额定电压、电流及辅助触头的数量、电流容量应满足控制回路接线要求。要考虑接在接触器控制回路的线路长度。一般推荐的操作电压值，接触器要能够在 85%~110% 的额定电压值下工作。如果线路过长，由于电压降太大，接触器线圈对合闸指令有可能不起反映；由于线路电容太大，可能对跳闸指令不起反映。

(5) 根据操作次数校验接触器所允许的操作频率。如果操作频率超过规定值，额定电流应该加大一档。

(6) 接触器和其他元器件的安装距离要符合相关国标、规范，要考虑维修和走线距离。

6.1.2 接触器的特殊用途与选用原则

6.1.2.1 接触器触头并联和串联使用

接触器触头并联可以加大过电流能力，串联可以增加耐压。

因为触点接触电阻不可能完全相同，电流不会平均分配，三组并联的过流能力为单个的 2~2.4 倍，多个串联后

的工作电压不能高于单个接触器的绝缘电压。

6.1.2.2 在电网频率不等于 50Hz 及存在电流高次谐波的电气系统中使用

(1) 各极电路和导体的发热负载能力与电网频率的关系。交流与直流不一样，在交流时，导体的截面并不是到处均匀地流过电流。电流密度从导体表面到导体内部逐渐降低，频率越高，降低就越大。如果频率十分高，则导体内部几乎无电流流过，电流只是在导体表面的薄薄一层中流过，这种现象称为集肤效应。这种现象的作用是使导体截面只有一部分用来流通电流，且使导体的交流电阻随频率的增高而呈线性地增高。例如对于直径为 10mm 的铜线来说，可利用的截面：在 1kHz 时约为 60%；在 10kHz 时约为 20%。

频率较高的交流电还会引起其他现象，在相邻的铁磁材料中产生磁感应。通过这种感应在导电材料中产生的实际功率是作为耗损热量出现的。这种“磁滞损耗”随频率的上升而迅速增加。

在相邻金属材料中感应的电压和由此而产生的电流是与流过导线的电流频率成正比的。这种电流同样会引起损耗，人们将这种损耗称为“涡流损耗”。

所以，随着频率的升高，由于集肤效应而使导体电阻升高，同时也使连接电路相邻的金属材料中的磁滞和涡流损耗随之增加。

考虑到工作电流频率对导体本身和相邻磁性材料的影响，表 2.10-17 列出了频率至 400Hz 时接触器允许的工作电流。

表 2.10-17 频率至 400Hz 时接触器允许的工作电流

频 率 (Hz)	允许的工作电流
100	$0.933I_e$
200	$0.871I_e$
300	$0.836I_e$
400	$0.812I_e$

注 I_e 为 50Hz 时的额定电流。

(2) 电网频率不等于 50Hz 时的通断能力。交流回路与直流回路不同的是，电弧在每次电流过零时刻熄灭，而在后续的半波中经重燃后又可能继续存在。只有在电流过零后成功地阻止重燃，才能有效地分断电弧电流。由此而得出交流熄弧的特殊措施。也就是说，在触头断开后，应使断口，即动静触头之间的空间，尽快驱散原先存在电弧时出现的载流子，这样就使恢复电压不能重新点燃断口间隙。

在频率较高时，电流十分迅速地一个又一个地过零，从而缩短了每个半波的电弧周期，断口电离度也就小于 50Hz 时的电离度。在考虑到频率对开关性能有影响的前提下，一般来说，交流开关电器也可以使用于频率为 50Hz 的场合下，直至使用于 500Hz 下。

1) 频率高于 50Hz 时接触器控制电动机时的通断能力。额定频率高的电动机，其起动电流有部分是高于 50Hz 时的起动电流。在最不利的情况下，例如在 200Hz 时达 15 倍，而在 400Hz 时达 20 倍额定电流。此外，这类电动机的功率因数 $\cos\varphi$ 在个别情况下仅为 0.25。

总之，对接触器来说，在较高频率时，由于发热特性的变化必须按表 2.10-17 等所列的值相应地降低额定工作电流 I_e 。

2) 16 2/3Hz 时接触器的通断能力。在 50Hz 和三相运行时允许的满载电流，用在 16 2/3Hz 和 400/380V 时，可

通过两极电路的串联而允许使用相同的值。额定工作电压至500V和16 2/3Hz时,为了能使用满载的额定工作电流,应将各级电路全部串联。

(3) 电网频率不等于50Hz时过载继电器的动作特性。热继电器是用双金属工作的,它是直接通过工作电流加热或通过电流互感器的输出电流来加热的。因此,不用电流互感器加热的继电器也可用于直流并能保证它的脱扣特性曲线。

由于工作电流加热的双金属片,在频率约至500Hz范围内,主要是电流热量。附加感应热量在这一频率范围内实际上小得可以忽略不计,所以脱扣时间只是略微比50Hz时要快一些。然而,当频率大于500Hz时,感应发热就越来越大,脱扣时间也随之变快。

如将热继电器接在过电流系数较高的总电流互感器上,用在频率大于50Hz且小于400Hz范围内时,脱扣时间要比50Hz时的快一些。装有饱和互感器并用于重载起动的过载继电器具有慢动作脱扣特性曲线,如用在400Hz的频率时,脱扣时间就明显加快。

(4) 电流高次谐波对过载继电器动作特性的影响。如果电网电压含有高次谐波或者连接在饱和区域中工作的用电设备,会出现电流高次谐波,就像在荧光灯补偿线圈上出现的那样。用相位角控制的用电设备也会在电网中产生高次谐波。当电网中出现高次谐波时,电容器吸收的电流就要比正弦电网中不出现高次谐波时的大。

双金属片式热继电器在达到电流有效值时动作,这同样也适用于采用具有较高过电流系数的互感器供电的过载继电器。

用饱和互感器,即过电流系数 n 较低的互感器加热的过载继电器,当电流中含有较强高次谐波时,就会出现较快动作的脱扣特性曲线。

电子式过载继电器是按50~60Hz的正弦频率设计的。如果电网中的高次谐波含量较高,一般来说应使用热继电器或热敏电阻电动机电器来取代。

(5) 频率对电磁操作系统的影响。

1) 交流电磁操作系统。交流电磁系统的吸力是与磁感应强度的二次方成正比例的,而磁感应强度反过来又与线圈上所荷电压的频率成反比。随着频率的升高,按指定额定频率设计的线圈的吸力就降低;随着频率的降低,吸力就增大。为了保持与50Hz时相同的吸力,在不同于50Hz频率时应提高或降低控制电压。

举例1:接触器电磁线圈的铭牌上写的是230V、50Hz,而接触器现使用在60Hz频率的场合中。这在控制电压为

$$U_s = \left(\frac{60}{50} \times 230 \right) V = 276V$$

时是可行的。

在接触器处于闭合状态时,电磁线圈所耗功率是近似地按相同的比例60:50(系数1.2)提高。这种换算方式只允许使用在50~60Hz的频率范围内。

交流操作接触器的电磁操作系统是按频率为50~60Hz的控制电压来设计的。当频率不同于这一范围时,控制电压必须检波并用直流操作的接触器,这样就能保持电磁线圈(85%~110%) U_s 的全部工作电压范围。作为电磁线圈的控制电源,额定供电电压应规定为0.9倍交流控制电压。

举例2:120Hz时控制电压220V,应用直流操作的接触器。在全波整流时,电磁线圈的额定电压为 $0.9 \times 220V = 198V$ 。

不允许使用滤波电容器,因为它会使接触器上所荷的电压升高。

为了缩短接触器的分断时间,必须分断直流回路中的接触器线圈[见图2.10-16(a)]。如在交流回路分断[见图2.10-16(b)],则就像在二极管电路时一样,分断时间一般来说将增加9倍左右。这只是在不受限制地接有自振荡二极管时才允许的,否则会存在“二级释放”的危险。

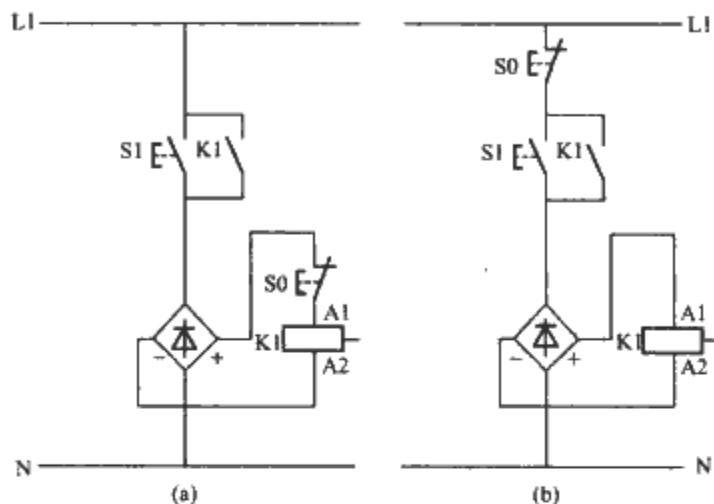


图 2.10-16 接触器电磁操作系统

(a) 直流回路中的操作(只是在断电时延时分断);

(b) 交流回路中的操作(任何情况下都延时分断)

2) 直流电磁操作系统。在用直流电压控制操动机构时,使用特殊的直流磁系统,或者使用带经济电路的交流磁系统。

在直流经济电路中,交流电磁操作系统必须具有很高的接通功率(大概是保持功率的10~40倍)。通过带有吸合线圈和保持线圈来实现对操动机构的控制,或者通过一个串接线圈来降低保持电流,从而实现对操动机构的控制。接通时间约为交流控制时的一半。分断时间与交流控制时几乎相同。然而,机械寿命由于接通速度高而低于直流磁系统时的机械寿命。

使用直流磁系统时,接通功率与长期工作时所需的功率是一致的。因此,电子式控制系统的控制变压器和输出级可根据长期工作制功率来设计。通断时间大于交流操动机构。如与直流经济电路相比,由于通电时间比较平稳与柔和,所以机械寿命比较高。

6.1.2.3 交流接触器用于控制直流负载。如果将按50/60Hz的交流电压设计的低压开关电器用于直流电网,则必须注意下列各点:

- (1) 各级电路的载流能力。
- (2) 触头寿命。
- (3) 通断能力。
- (4) 动作特性。

6.1.2.4 交流接触器用于通断电容器组在接通电容器时,电容器经振荡过程而被充电到它的稳定值。此时,频率从几百赫兹提高到几千赫兹,于是就出现极高的电流尖峰。这对开关电器提出了特殊的要求。对接通电流的振幅和频率起重要作用的是接通回路中的电容器电容、电抗和接通电网电压的时间点。

当在电网上接通具有一定功率的电容器时,接通电流主要决定于变压器的功率大小以及从电网至电容器的阻抗。

为了能以较少的费用来实现电容器的接通,往往需要采取附加措施。在这里,例如可通过电容器分支回路中的附加电感来提高可切换的电容。

使用特殊的电容器接触器或电容器—接触器组合装置，通过预充电电阻将电容接入电网，就能达到很高的、可切换的电容，并能降低对三相供电电网的反作用，因为接通电流经过电阻时受到一定的限制而显著地衰减。

6.1.2.5 照明设备的通断

照明设备的种类很多，不同类型的照明设备起动电流

和起动时间也不一样。此类负载使用类别为 AC-5a 或 AC-5b。如果起动时间很短，接触器可选择其约定发热电流等于照明设备工作电流的 1.1 倍。起动时间较长以及功率因数较低，接触器可选择其约定发热电流 $I_{th}(I_{the})$ 比照明设备工作电流大一些。表 2.10-18 为不同照明设备用接触器选用原则。

表 2.10-18 不同照明设备用接触器选用原则

序 号	照明设备名称	起动电流	功率因数	起动时间 (min)	接触器选用原则
1	白炽灯	$15I_{st}$	1		$I_{th}(I_{the}) \geq 1.1I_e$
2	混合照明	$1.3 I_{st}$	≈ 1	3	$I_{th}(I_{the}) \geq 1.1 \times 1.3I_e$
3	荧光灯	$\approx 2.1I_{st}$	0.4~0.6		$I_{th}(I_{the}) \geq 1.1I_e$
4	高压水银灯	$\approx 1.4I_{st}$	0.4~0.6	3~5	$I_{th}(I_{the}) \geq 1.1 \times 1.4I_e$
5	金属卤素灯	$1.4I_{st}$	0.4~0.5	5~10	$I_{th}(I_{the}) \geq 1.1 \times 2I_e$
6	带功率因数补偿的灯	$20I_{st}$	0.5~0.6	5~10	按补偿电容起动电流选用

6.1.2.6 交流接触器用于通断电热设备

电热设备包括用于室内取暖的电阻炉和空调设备。

对于电阻丝元件，接通电流为 1.4 倍额定电流。考虑到电网电压可能升高 10%，则电阻丝元件的工作电流也将相应提高。在选用开关电器时，对额定工作电流的选择务必考虑到这一实际情况。使用类别以交流 AC-1、直流 DC-1 作为依据。用具有相应通断能力的开关电器就足以能通断这种负载。

加热回路大多采用单极工作。此时，一般都应用电路并接的多极式开关电器，这样就能提高允许的负载电流。

6.1.2.7 交流接触器用于通断变压器

在接通低压变压器时，会出现短时的电流峰值。通过磁场结构引起的峰值电流可达到变压器额定电流的 30 倍。不同类型的变压器，其接通电流峰值也是不同的。它决定于绕组的位置、磁回路的特性数据，特别是决定于接通时的电压相位角。为了防止主触头的熔焊，接触器必须具有相应的、很高的接通能力。

当接触器额定电流 $I_e \leq 100A$ 时， $I_T \leq 12I_e$ 峰值

当接触器额定电流 $I_e > 100A$ 时， $I_T \leq 10I_e$ 峰值

式中： I_e 为接触器 AC-3 使用类别额定工作电流，A； I_T 为变压器最大空载接通电流，A。

6.1.2.8 交流接触器用于矩形交流电压

如将交流接触器用于由蓄电池和串接逆变器或斩波器组成的电网中，则必须注意通断能力和磁能。

6.1.2.9 交流接触器用于通断空调压缩机电动机负载

用于通断空调压缩机电动机负载的接触器的周围空气温度标准上限值规定为 65℃；而周围空气温度的标准下限值为 -25℃。因此，暖通空调及制冷设备专用接触器的动作特性、温升和机械寿命试验应在 70℃ 周围空气温度下进行。

用于通断空调压缩机电动机负载的接触器大多可能安装在户外，所以必须耐受更严酷的大气条件，在 25℃ 时相对湿度高达 100%。所以，暖通空调及制冷设备专用接触器的交变湿热试验应做 10 昼夜及以上，而有的高标准要达到 500h(超过 20 昼夜)。另一种方法是用比通用接触器更长的耐受盐雾试验时间(比如高达 72h 以上)来考核。

通断空调压缩机电动机负载接触器主要用于密封式压缩机电动机的起动，密封式压缩机电动机因为用冷却剂冷却，所以其功率额定值可能与标准的开启式电动机有相当大的差别。例如，3HP 的压缩机电动机的性能可能与标准的 5HP 电动机的性能相似。

压缩机电动机达到全速需要较长的时间，通常高达几百到上千毫秒，是标准电动机的 10 倍以上。暖通空调及制冷设备专用接触器在这样长的时间里必须能够经受得住起动电流。验证此项性能的试验在 IEC 60947-4-1 或 GB 14048.4 标准中为 AC-8b 使用类别的约定操作性能试验或 ARI 780/790 标准中的循环负载试验(Recycle Load Test)，这两种试验方法都要求暖通空调及制冷设备专用接触器接通和分断 6 倍额定电流，而接通时间持续 1s，分断时间 9s，经受 6000 次的考核(ARI 780/790 标准为 10000 次)。

6.1.2.10 接触器在高海拔环境条件下的使用

普通低压电器的正常工作条件是海拔高度不超过 2000m，而我国如青藏地区平均海拔在 3000m 以上，尤其是青藏铁路最高处唐古拉山垭口达到了 5070m。随着海拔的增高，高原气候环境的变化，产品的动作性能、电气间隙、介电性能、温升、灭弧性能、通断能力以及安装使用等均要受到影响。

由于高原环境条件下气候环境的变化，随着空气压力的降低，其击穿电压也随之下降，为了保证产品在高原使用时有足够的耐击穿能力，需增大产品的电气间隙。

随着海拔的增高，考虑到空气介电强度和冷却效应的降低，产品介电强度也要进行修正，一般工频试验电压值按使用地点海拔每升高 100m，增加 1%。例如海拔 5000m，绝缘电压 690V，工频耐压为 2500V 时，在海拔 2000m 的试验地点，工频试验电压值则修正为 3250V。

由于空气压力或空气密度的降低引起空气介质冷却效应的降低，产品的温升随海拔升高的增加率，每 100m 一般在 0.4K 以内。因此，要考虑接触器线圈及触头的温升。但由于存在着平均空气温度和最高空气温度均随着海拔的升高而降低，高原环境空气温度的降低可以全部补偿因气压降低而引起产品运行中温升的增加。环境空气温度的补偿值一般为 0.5K/100m。

高原最低空气温度为 -45℃，因此要考虑产品动作性能满足低温使用要求，并能可靠吸合和释放，且具有足够的机械寿命。

空气压力或空气密度的降低使得空气介质灭弧性能降低，同时交流接触器的飞弧距离随海拔升高或气压降低而增加。考虑到对产品灭弧性能的影响，需对触头开距等参数作适当调整，使接触器能够在 5000m 高海拔下可靠接通和分断，所产生的电弧能够自然熄灭。

产品的安装使用要考虑到高原环境的特殊条件，如高原

紫外线辐射照度增加,高原热辐射增加等,也能导致电器绝缘材料老化或变形。产品安装时,应防止太阳直接照射,加装必要的防护措施,如安装在防护等级较高的箱体内部。

6.1.3 接触器使用时短路保护和配合方式

接触器使用熔断器或断路器作为短路保护,统称为短路保护电器(SCPD)。GB 14048.4/IEC 60947-4-1 标准规定了两种配合类型,并规定了接触器与短路保护电器协调配合的试验方法。两种短路试验电流是有区别的:

- (1)“面向实际”的短路电流 I_r 。
- (2)额定短路电流 I_q 。

试验电流 I_r 是与接触器额定工作电流分级配合的短路电流。此时,这种电流与接触器的 AC-3 工作制的额定工作电流有关。试验电流 I_q ,在标准中对此值未做规定,因此,应由用户与生产厂商协商而定。如果试验电流 I_q 大于试验电流 I_r ,则在生产厂提供的技术资料中,在提到此值(例如 50kA)时应指明是供协商用。

在短路情况下,应用的短路保护装置必须可靠而顺利地分断出现的过电流,并不允许危害人身以及系统中的其他部件。与短路分断后的损坏程度相对应的两种不同的协调配合:

(1)“1”型协调配合。要求接触器在短路条件下不对人及设备引起危害,在未修理和更换零件前,允许不能继续使用。

(2)“2”型协调配合。要求接触器在短路条件下不对人及设备引起危害,且应能够继续使用,允许触头熔焊,但制造厂应指明关于设备维修所采用的方法。

接触器的制造厂应在其提供的技术资料中对接触器的短路保护做出规定。需要说明的是,选用不同于制造厂推荐的 SCPD 时,协调配合可能会无效。

6.1.4 使用与维护

交流接触器在吸合、断开时振动比较大,在安装时尽量不要和振动要求比较严格的电气设备安装在一个柜子里,否则应采用防振措施,一般尽量安装在柜子下部。交流接触器的安装环境要符合产品要求,安装尺寸应符合电气安全距离、接线规程,而且要检修方便。

接触器出厂时,开距、超程等参数均已调好,用户可直接使用,不可随意调节。

接触器在运行中应定期检查、维护,检查周期就具体工作条件决定,检查时应切断电流。检查项目如下:

- (1)清除灰尘污垢,尤其是注意保持进出线相间的清洁,以防造成相间短路,同时注意清除铁心极面的污垢。
- (2)清理灭弧罩内的碳化物及金属颗粒。
- (3)清理触头表面的金属颗粒,但不允许修锉触头表面。
- (4)拧紧所有的紧固件。
- (5)在用户遵守保管和使用条件下,从制造厂发货之日起,不超过 18 个月,产品如因制造质量问题而发生损坏或不能正常使用时,制造厂应无偿更换或修理产品。

6.2 起动器的选用

6.2.1 低压电动机的保护

用作绝缘的材料,它的耐受能力取决于发热、电和机械的负载,以及有害的大气影响,例如湿度、化学物质和各种污染的影响。绝缘材料在一般的工作条件下,只要它们不超过各绝缘等级的极限温度,都可以达到规定的寿命。

(1)发热过载的原因。由于下述原因,电动机会出现发热过载:

1)由于工作方式而增加损耗,例如持续工作中出现过高的负载转矩;在通断操作时相对的接通时间长;由于转动惯量过高和操作频率过高而使起动过程或制动过程太长。

2)在运行时转子堵转。

3)接线和操作错误。

4)由于电网的特性,即电网频率或电网电压与额定值之间的误差过大而引起过高的损耗,电网进线断线(所谓断相)。

5)冷却的影响,即冷却介质的温度升高,安装地点海拔的提高,冷却介质流动受阻。

(2)电动机保护装置的保护范围。在正常的工作条件下,断路器或开关组合装置“接触器、过载电器和熔断器”完全能提供足够的过载保护。在不正常的工作条件下,如起动和制动过程过长、操作频率过高或单相运转时,对于定子临界式电动机来说,采用热敏电阻电动机保护装置,即可获得完全保护。此外电动机温升过高不是因过电流引起的,而是由于例如冷却介质流动受阻引起的,通常也是宜用热敏电阻电动机保护装置。

对于转子临界式电动机来说,除采用热敏电阻电动机保护外,还应配装过载继电器或过载脱扣器。

(3)补偿的三相交流电动机的保护。为了补偿电动机无功电流,应连接电容器,并与电动机同时接通与分断。取自电网的基本上只是有功电流 I_a 。这种电流流过开关电器和过载继电器或过载脱扣器。因此,这类电器就按其有功电流整定。

可按关系式

$$I_r = \frac{I_N \cos \varphi}{0.9}$$

十分准确地求出整定电流 I_r ,式中的额定电流 I_N 和 $\cos \varphi$ 可取电动机的铭牌所标值。

(4)变极三相交流异步电动机的保护。带 1 个绕组(达兰德电路)、2 种转速和 1 种旋转方向的变极三相交流异步电动机,根据转速输出不同功率,取用不同大小的电流。转速越高,耗用的电流就越大。因此,对每种转速应配装一个过载继电器,它们的整定电流应与各自的电动机额定电流相协调。

变极电动机可采取下述相同的措施:

1)带有 2 个单独绕组、具有 3 种转速和 1 种转速方向的变极三相交流异步电动机,总共需 3 个过载继电器,它们的整定电流应与不同的电动机额定电流相匹配。

2)带有 2 个单独绕组(2 个绕组为达兰德电路)、具有 4 种转速和 1 种旋转方向的变极三相交流异步电动机,每种转速都需配装各自的过载继电器,也就是说,此时需要 4 个过载继电器。

(5)重载起动三相异步电动机的保护。按正常工作条件选用合适的过载保护装置,如遇电动机重载起动,则驱动电动机需要更长的起动时间,过载继电器在电动机起动时间内就发生分断。例如,直径和飞轮质量都比较大的离心机和通风机以及荷有负载起动的输送带和磨煤机上都会出现这种情况。为了保护这类驱动电动机,就必须应用延时式过载热继电器或重载起动用的电子式延时过载继电器。这类过载继电器是按重载起动时的高要求设计的,其他开关电器和导线都按要求设计。

(6)用电子式过载继电器时的重载起动。应用这种过载继电器时,通过装在脱扣电器中的电流互感器模拟地检测各相中的电动机电流。为此,必须使用具有很高过电流倍数的

电流互感器。脱扣时间在全部分整定范围中是稳定不变的。

(7)在操作频率较高时的三相异步电动机的保护。将过载继电器与接触器组合后使用在操作频率较高的场合时，必须注意的是过载继电器用在较高操作频率时的局限性。允许的操作频率即每小时的操作次数一般不超过 40 次。在更高的操作频率时，三相交流异步电动机采用过载继电器就不能实现真正的保护，必须应用热敏电阻电动机保护电器。

(8)星—三角起动时三相交流异步电动机的保护。电动机在星形电路时耗用电网的电流仅为额定电流的 $1/\sqrt{3}$ ，而在三角形电路和额定负载时却流过全部额定电流。因此，将过载继电器接在绕组回路中，并整定到绕组额定电流，即 $1/\sqrt{3}$ 倍(0.58 倍)电动机额定电流。这样，只需 1 台继电器就能在星形电路中，也能在三角形电路(稳定运行)中保护电动机。

6.2.2 高压电动机的保护

高压电动机大多是使用二次回路用的过载继电器。二次回路用过载继电器与主电流互感器相接，主电流互感器必须具有足够的短路强度。此外，它们是接入电动机的星形中性点上。主电流互感器的误差限值为 3%，且额定过电流倍数不小于 10。它的功率必须与过载继电器的耗用功率，包括线路负载相协调，以便确保符合规定的脱扣特性曲线。

过载继电器和主电流互感器的选用原则是：在电动机额定电流时，二次侧流过的电流应位于过电流继电器的整定范围内。

6.2.3 防爆增安型“EExe”的三相异步电动机的保护

由于过载而使电动机出现不允许的发热。此时，可作为电动机保护装置的有：

- (1)具有反时限延时脱扣特性的过载保护装置。
- (2)用温度传感器直接进行温度监控保护的装置。

6.2.4 起动器与短路保护电器 SCPD 的协调配合

协调配合类型(保护型式)与接触器和 SCPD 的保护类型一致，即：

(1)“1”型协调配合。要求接触器或起动器在短路条件下不应对人及设备引起危害，在未修理和更换零件前，允许不能继续使用。

(2)“2”型协调配合。要求接触器或起动器在短路条件下不应对人及设备引起危害，且应能够继续使用，允许触头熔焊，但制造厂应指明关于设备维修所采用的方法。

验证协调配合类型的试验规定在 I_q 、 I_r 、 I_{∞} 电流下分别进行：

(1)额定限制短路电流 I_q 。标准中对此值未做规定，且仅当 I_q 大于试验电流 I_r 时，才进行 I_q 电流试验。

(2)预期电流 I_r 。与额定电流有关，GB 14048.4 中的规定见表 2.10-19。

表 2.10-19 相应于额定工作电流的预期试验电流 I_r

额定工作电流 I_e (AC-3) (A)	预期电流 I_r (kA)
$0 < I_e \leq 16$	1
$16 < I_e \leq 63$	3
$63 < I_e \leq 125$	5
$125 < I_e \leq 315$	10
$315 < I_e \leq 630$	18
$630 < I_e \leq 1000$	30
$1000 < I_e \leq 1600$	42
$1600 < I_e$	由用户与制造厂协商

(3)交点电流 I_{∞} 。表征起动器和相应的 SCPD 的时间—电流特性的平均曲线或规定曲线的交点处的电流。

通过验证起动器和 SCPD 在其时间—电流特性交点电流 I_{∞} 附近的特性可验证起动器和相应的 SCPD 的是否能协调配合。

需要说明的是，选用不同于制造厂推荐的 SCPD 时，协调配合可能会无效。

6.3 接触器与起动器常用的电气控制电路

6.3.1 直接起动控制电路

如图 2.10-17 所示是电动机单向旋转接触器控制电路。图中 Q 为隔离开关，FU1、FU2 分别为主电路与控制电路熔断器，KM 为接触器，FR 为热继电器，SB1、SB2 分别为停止按钮与起动按钮，M 为三相笼型异步电动机。

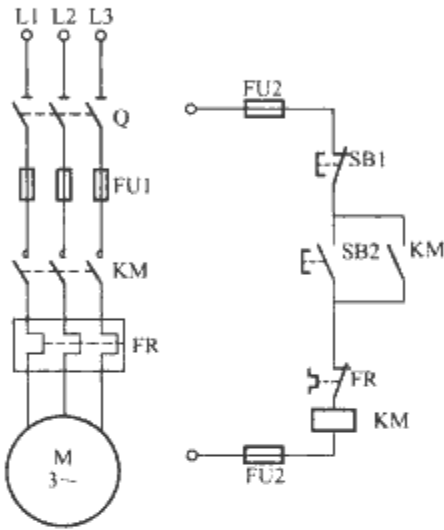


图 2.10-17 电动机单向旋转接触器控制电路

电路工作情况：

(1)起动。合上隔离开关 Q，按下起动按钮 SB2，接触器 KM 线圈通电吸合，KM 动合辅助触头闭合自锁(该动合辅助触头称为自锁触头)，KM 主触头闭合，电动机接入三相交流电源起动。

(2)停止。按下停止按钮 SB1，接触器 KM 线圈断电并释放，KM 主触头断开，电动机停止工作。

电动机运行时，电源停电，电动机停转。在恢复供电时，由于接触器线圈断电，其主触头与自锁触头均已断开，所以主电路和控制电路都不会自行接通，电动机不会自行起动，只有再次按下起动按钮 SB1 方可使电动机再起动。

电路保护环节：

(1)短路保护。由熔断器 FU1、FU2 分别实现主电路与控制电路的短路保护。

(2)过载保护。由热继电器 FR 实现电动机的长期过载保护。当电动机出现长期过载时，FR 串接在控制电路中的动断触头断开，切断 KM 线圈电路，KM 主触头断开，实现过载保护。

(3)欠电压和失电压保护。由接触器 KM 实现。

6.3.2 可逆运行控制电路

如图 2.10-18 所示是按钮控制电动机可逆运行控制电路。其中图 2.10-18(a)所示电路系由两组单向旋转控制电路组合而成，主电路由正反转接触器 KM1、KM2 的主触头来改变电动机相序，实现电动机的可逆旋转。但图 2.10-18(a)所示电路若发生同时按下正转起动按钮 SB2 和反向起动按钮 SB3 时，由于正反转接触器 KM1、KM2 线圈均通电吸合，其主触头闭合，将发生电源两相短路。为此，将 KM1、

KM2 正反转接触器的动断触头串接在对方线圈电路中, 形成相互制约的电气联锁, 如图中 2.10-18(b)所示, 从而避免了误操作时发生相间短路故障。要实现电动机由正转变反转或由反转变正转的控制, 都必须先按下停止按钮 SB1, 然后再进行反转或正转的起动控制, 这就构成了正—停—反或反—停—正的操作顺序。

为了实现电动机直接由正转变为反转或由反转变为正转, 可采用如图 2.10-18(c)所示电路, 即在图 2.10-18(b)所示电路的基础上增设了起动按钮 SB2、SB3 的动断触头构成的按钮互锁电路, 从而构成具有电气、机械双重互锁的控制电路。这样操作时无需再按停止按钮, 直接按下反转按钮 SB3 可使电动机由正转直接变为反转, 反之亦然。

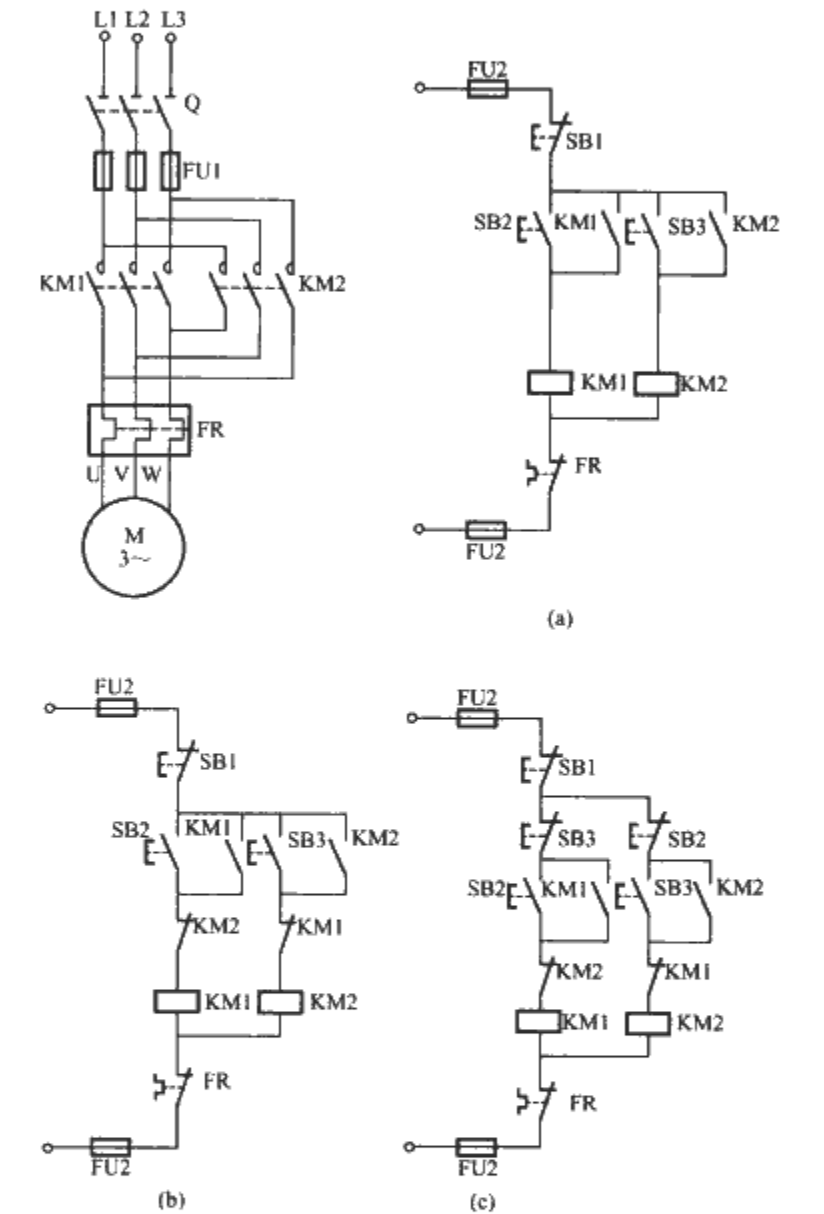


图 2.10-18 电动机可逆运行控制电路
(a) 方案一; (b) 方案二; (c) 方案三

6.3.3 定子串电阻 (或电抗) 减压起动

起动时, 起动电流在电阻或电抗上产生电压降, 使加在电动机定子绕组上的电压低于电源电压, 使起动电流减小。待电动机转速接近额定转速时, 再将电阻或电抗短接, 使电动机在全压下进入稳定运行。如图 2.10-19 所示是定时自动短接电阻减压起动电路。如图 2.10-19(a)所示为自动短接电阻减压起动电路, 如图 2.10-19(b)所示是自动与手动短接电阻减压起动电路。

6.3.4 自耦变压器减压起动控制

电动机自耦变压器减压起动也称为自耦补偿起动, 起动时将自耦变压器一次侧接在电网上, 二次侧接在电动机定子绕组上, 待电动机转速接近电动机额定转速时, 再将电动机定子绕组接在电网上进入正常运转。

与定子串电阻 (或电抗) 减压起动相比, 在电网限制的

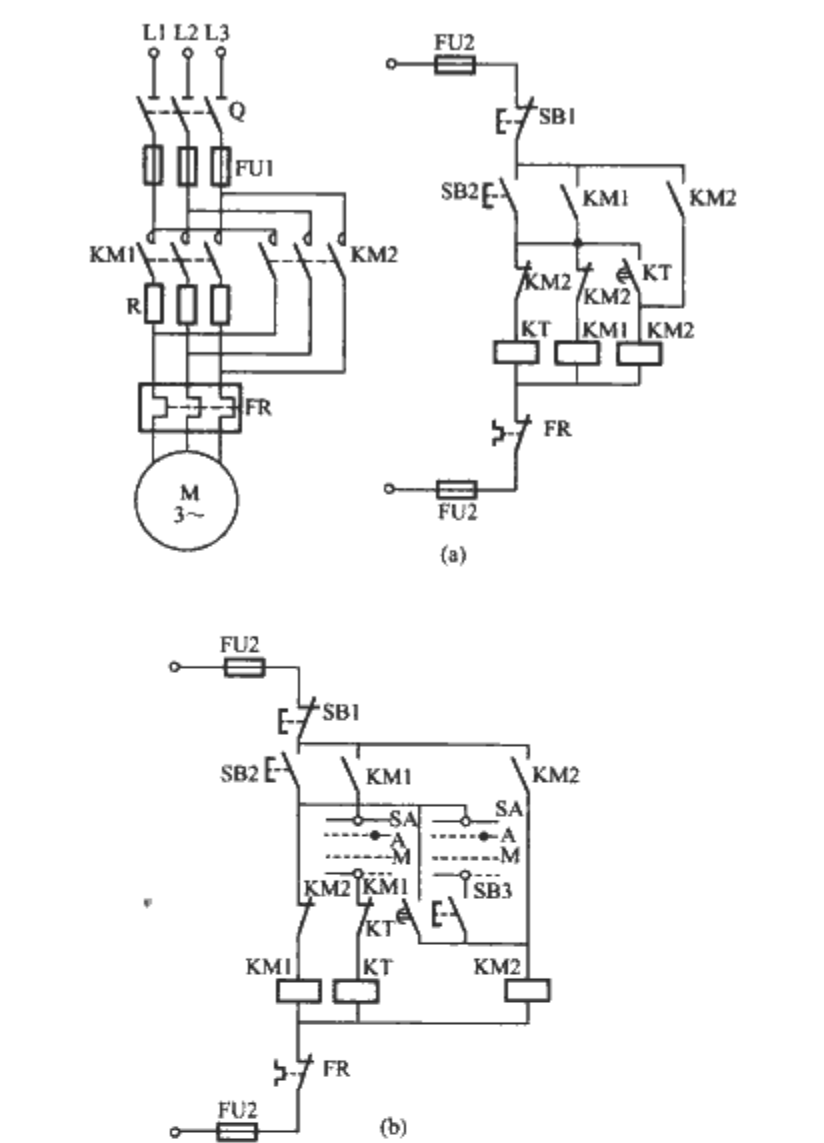


图 2.10-19 定时自动短接电阻减压起动电路
(a) 自动短接电阻减压起动; (b) 自动与手动短接电阻减压起动

起动电流相同的情况下, 自耦变压器减压起动将获得较大的起动转矩, 缺点是线路较复杂, 设备价格较贵, 不允许频繁起动。

如图 2.10-20 所示是自耦减压起动器电路图。

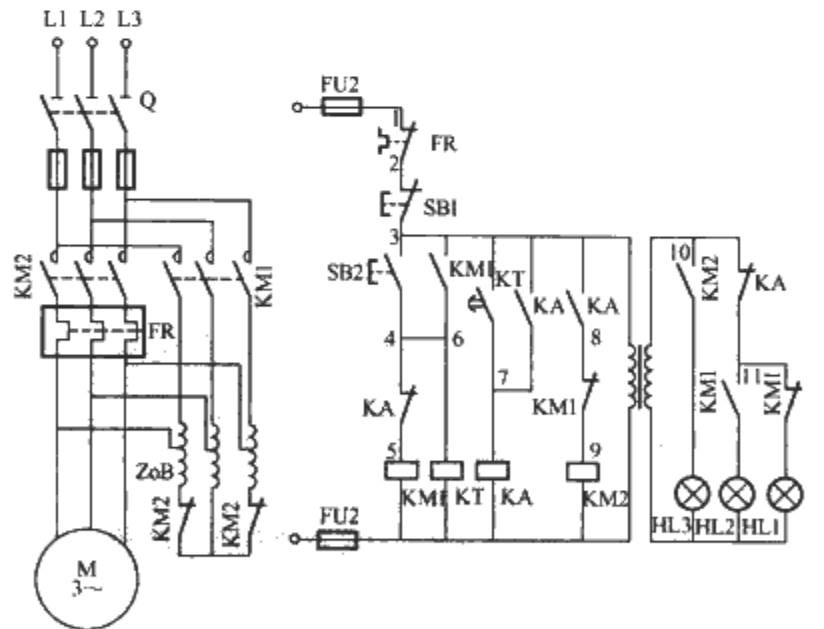


图 2.10-20 自耦减压起动器电路图

6.3.5 星—三角减压起动控制电路

对于正常运行时电动机定子绕组接成三角形联结的三相笼型电动机, 起动时均可采用星—三角起动。起动时, 先将定子绕组按星形联结, 接入三相交流电源, 此时电动机相电压仅为正常工作电压的 $1/\sqrt{3}$, 起动电流和起动转矩都为直接起动时的 $1/3$ 。待电动机转速接近额定转速时, 再将电动机定子绕组改成三角形联结, 各相绕组承受额定工作电压,

电动机进入正常运转。

星—三角起动电路按电动机主电路所用接触器数目分为两接触器式与三接触器式。

(1) 两接触器式星—三角减压起动控制电路。如图 2.10-21 所示是用两个接触器和一个时间继电器实现星—三角起动的控制电路。图中 KM1 为线路接触器，KM2 为星—三角转换接触器，KT 为减压起动时间继电器。

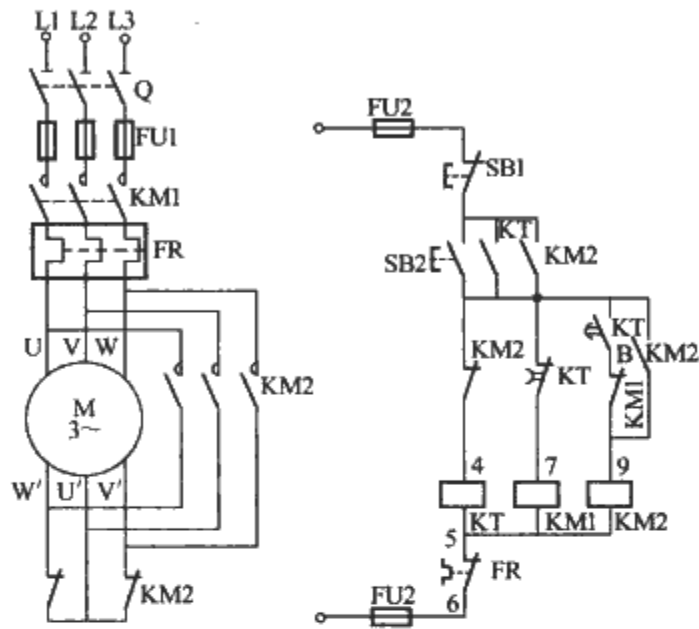


图 2.10-21 两接触器式星—三角减压起动电路

(2) 三接触器式星—三角减压起动控制电路。如图 2.10-22 所示是自动星—三角起动器电路图。图中 KM1、KT、KM3 同时闭合，电动机接成星形联结，当电动机转速接近额定转速时，通电延时型时间继电器 KT 动作，KM3 断开，KM2 闭合，电动机由星形联结改成三角形联结。

(3) 延边三角形减压起动。三相笼型异步电动机采用星—三角减压起动，其起动转矩只为全压下起动转矩的 1/3，不适用于重载起动。而延边三角形减压起动是一种既不增加专用起动设备，又可提高起动转矩的一种减压起动方法，它适用于电动机定子绕组具有 9 个端头的笼型异步电动机。

如图 2.10-23 所示是延边三角形减压起动电路，图 2.10-23(a)所示为延边三角形起动电动机定子绕组接线图，图 2.10-23(b)所示为延边三角形减压起动电路。图中 KM1 为延边三角形联结接触器，KM2 为线路接触器，KM3 为三角形联结接触器，KT 为起动时间继电器。当 KM1、KM2 触头闭合，KM3 触头断开时，U2U3-V2V3-W2W3 联结成

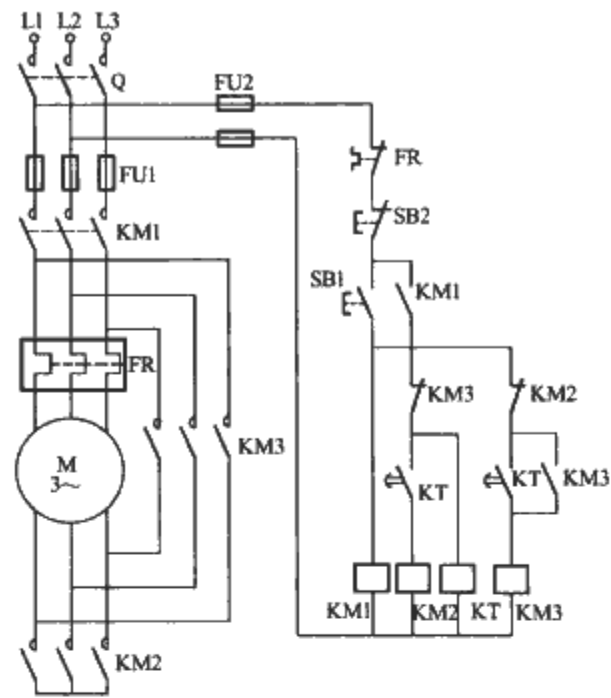


图 2.10-22 自动星—三角起动器电路图

一个三角形，三角形的各联结点再经 U1U2、V1V2、W1W2 延伸出去，构成延边三角形接到三相电源上。当 KM2、KM3 触头闭合、KM1 断开时，则 U1U3-V1V3-W1W3 构成三角形接于三相电源上。

7 其他品种的接触器

7.1 智能接触器

智能接触器主要有以下特点：

- (1) 主电路的无弧或少弧分断。
- (2) 智能化电磁系统。
- (3) 具有与数据总线及其他设备之间相互通信的功能。

7.1.1 主电路的无弧或少弧分断

接触器分断电路过程产生的强烈电弧不仅造成触头的磨损，降低了电寿命，而且是触头熔焊的主要原因之一。

可控电力电子器件具有操作频率高，使用寿命长，动作时间短等特点。用其制成的无触点开关可实现无弧接通与分断，但是这种开关的过电压、过电流能力较弱，成本很高，管压降大，这就限制了无触点开关在电路中的使用。而传统的有触点开关制造成本低、触头压降小，但是，其使用寿命

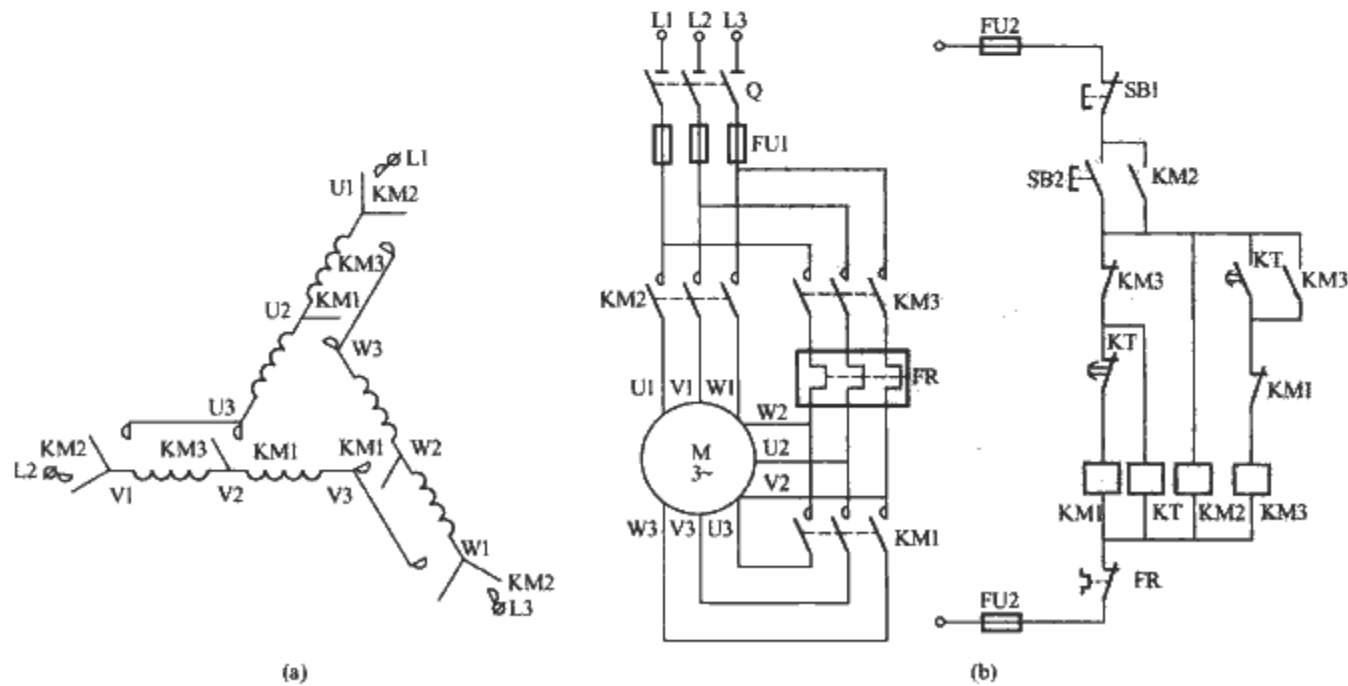


图 2.10-23 延边三角形减压起动电路

(a) 延边三角形起动电动机定子绕组接线图；(b) 延边三角形减压起动电路图

短,操作频率低,动作时间比较长,尤其是在触头分断时产生的电弧问题,一直是影响电器可靠运行的一个难以解决的问题。随着电力电子技术、计算机技术与电器技术的发展,将电力电子器件与传统的接触器组合起来,采用单片机控制,不仅使接触器的无弧通断成为可能,而且将实现其高性能、多功能。

交流电流每秒要通过零点 $2f$ (f 为电源频率) 次。如果能使交流接触器的触头在电流过零瞬间分开,并以较快的速度拉开到足以承受恢复电压而不发生瞬间击穿的距离,则此时触头间隙就不会产生电弧。同时,由于弧隙是未电离的,只需极小的极间距离就可承受较高的恢复电压。这种分断电路的方法称为同步分断。理想的同步分断电器是可以不采用灭弧装置的。

对接触器的触头系统进行改进,通过控制中间相触头的分断时刻,可达到三相触头均在电流过零点前分断电路,实现三相电路的同步分断。实现同步分断的关键是要有良好的电流传感器,用来检测主电路的电流。这种电流传感器与传统的电流传感器相比具有更强的抗干扰性能,在强大的电磁干扰(包括电弧干扰和电动力干扰)的影响下,要能够准确地反映主电路的电流变化情况,尤其能够检测到准确的电流零点。若零点的检测出现误差,那么就可能使主触头上的电弧在电流过零后重燃而失控。

事实上,要完全实现同步分断是十分困难的,主要原因如下:

1) 技术上无法保证开关电器的触头每次稳定地在电流的零点分断。由于工艺和动作机构等原因,开关电器的分断时间不稳定,即分断时间的分散性很大。

2) 要提高开关电器触头的分断速度,会给电器的动作机构带来一定的困难,增加电器的负担。

因此,具有实际应用价值的同步分断技术是控制接触器触头在电流过零前的某一极短时刻分开,同时提高触头的分断速度,使触头从分开到电流过零这段时间内动、静触头之间有足够的距离,即动、静触头在电流过零时已具有一定的开距,并且加上适当的灭弧措施,实现无弧或少弧分断。这样,减少了对触头固有动作时间的稳定性要求,提高了工程中的可行性,易于产品化。

采用单片机控制的混合式交流接触器,将传统的交流接触器与电力电子器件相结合,实现了无弧接通和分断。然而,由于其成本数倍于原来的交流接触器,因而未得到广泛应用。随着微电子技术与电力电子技术的迅速发展,智能混合式无弧交流接触器则综合了电力电子技术、计算机技术、电子技术与电器技术,其在交流接触器的每相触头上仅并联一个单向晶闸管。在上电初始化的过程中,通过电流互感器检测晶闸管漏电流情况,如果情况正常,单片机开始对控制电压进行采样,当电源电压超过接触器吸合的阈值电压以后,通过相序检测电路判断电源电压的相序。然后提前触发主电路晶闸管,并在合适的时刻接通接触器线圈,使接触器触头在3个晶闸管的共同导通区内完成吸合动作,从而消除吸合过程中的触头振动和弹跳引起的电弧,实现吸合过程的无弧接通。在保持状态,由低电压直流保持电路提供接触器的保持能量,实现节能无声运行。同时对晶闸管的漏电流进行实时监测,以保证混合式交流接触器的正常工作。

当接触器接到分断信号后,单片机系统触发主电路晶闸管,然后针对不同的电源电压相序,选择不同的分断时刻,以保证接触器触头在三相晶闸管共同导通区内分断。由于在触头分断过程中,主电路电流转移到晶闸管上,从而实现了

无弧分断。

7.1.2 智能化电磁系统

智能化接触器的电磁系统的控制主要体现在以下过程:

(1) 起动阶段控制。在起动过程中,单片机系统不断地对电源电压进行采样,并判断吸合的门槛电压,若电压高于吸合的门槛电压,再按不同的输入电压值选择相应的程序。在每个半波相应的时刻(导通相角)通过控制回路使主控元件导通,线圈在强励磁下工作。单片机系统在一定的导通时间后,通过控制回路使主控元件截止,起动过程结束。

(2) 闭合过程控制。在保持阶段,变压器的二次绕组的保持绕组提供一个合适的保持电压,经过续流回路使接触器线圈在直流小电流下工作。直流起动、直流保持的工作方式,大大地提高了接触器的性能指标。在整个运行过程中,单片机系统一直对电源电压进行检测,一旦发现电源电压小于释放电压,立即转入同步分断的控制程序,在一定的时间之后控制回路关断续流元件,接触器线圈断电。

7.1.3 通信控制功能

智能交流接触器通常采用 RS-485 总线标准,其传输数据是两条平衡导线,即输出端是双端平衡驱动器,输入端为双端差分放大器。这样,如果在传输过程中混入了共模干扰噪声信号,由于双端输入的差分作用,使干扰噪声相互抵消,增强了总线的抗干扰能力。RS-485 总线的信号地不共用,双方的信号地不必接在一起,从而避免了信号的偏移。RS-485 总线采用了双端平衡驱动,输入为双端差分放大,与 RS-232 总线相比电压信号放大倍数增加了一倍。另外,RS-485 总线的通信距离可达到 2km,远远超过了 RS-232 的通信距离。带通信功能的新型智能交流接触器,将微处理器和计算机技术应用于交流接触器产品中,实现与中心计算机之间的双向通信,主控计算机既可以显示智能交流接触器的工作状态信息,又可控制交流接触器的接通和分断状态。在采用滤波器、抑制器等项技术后,带通信功能的智能交流接触器实现了在脉冲群、浪涌等恶劣电磁干扰环境中正常通信与运行,具有很好的电磁兼容能力。

7.2 直流接触器

直流接触器的用途不如交流接触器广泛,但世界各国的制造厂家和科研机构仍然十分注意其发展,不过其发展速度总是落在交流接触器后面。

近几年来,传统式直流接触器的结构还是以平面布置结构最为普遍,主触头系统在上方,全部零件在绝缘板或金属板上,便于用单极组合成双极或多极接触器,而缺点是安装面积大。英国、美国、日本、德国及瑞典等国家的低压电器制造厂很少生产该产品。

国外许多厂家都采取由交流接触器派生直流接触器的办法。这样,交流接触器的大部分零件可与直流接触器通用,不必为生产增添更多的专用设备,便于生产管理,这就大大节约了投资,又增多了产品品种。派生直流接触器的体积小,工作可靠性高,分断能力高,维修和检查方便,既可交流操作,又可直流操作,适用于控制调速电动机,以及在一般直流电路中作开关使用。如果增大派生直流接触器的线圈电压,直流接触器还可用于控制电力机车及在电压波动很大的开关装置中作开关部件使用。

直流接触器的机械寿命一般为 500~1000 万次;电寿命根据使用条件而定;操作频率在 DC-2 和 DC-4 使用类别下为 600~750 次/h,在 DC-3 和 DC-5 使用类别下为 250 次/h;额定电压至 750V;额定电流至 400A。

7.3 真空接触器

7.3.1 真空接触器工作原理

真空接触器触头密封在真空容器中,以真空为灭弧介质。其触头灭弧系统通常称为真空灭弧室,电真空行业一般称其为真空开关管。真空接触器的动作与空气接触器相似,通过电磁系统带动其动触头运动,而动触头的运动是借助于波纹管实现的。

当其断开一定数值的电流时,动、静触头在分离的瞬间,电流收缩到触头刚分离的某一点或某几点上,使电极间电阻剧烈增大,温度迅速提高,直至发生电极金属的蒸发。同时形成极高的电场强度,导致剧烈的场强发射和间隙的击穿,产生了真空电弧。当工作电流接近零时,随着触头间距的增大,真空电弧的等离子体很快向四周扩散,电弧电流过零后,触头间隙的介质迅速由导体变为绝缘体,于是电流被分断,开断结束。

由于真空介质绝缘强度恢复速度极快,一般可达 $25\text{kV}/\mu\text{s}$ 以上,所以真空灭弧室产生的电弧通常在电流第一次过零时熄灭。

7.3.2 真空接触器操作过电压

由于真空介质良好的熄弧性能使真空电器较其他电器存在较明显的操作过电压。真空电器操作过电压主要有截流过电压、重燃过电压、预击穿过电压。实际使用与试验结果表明,低压真空接触器不存在预击穿过电压,重燃过电压也基本不存在。这两类过电压主要存在于高压真空电器,对低压真空接触器来说主要是截流过电压。

真空电弧是触头蒸发的金属蒸气电离形成的电弧,当电流过零前金属蒸气明显减少,金属蒸气向四周迅速扩散,使电弧电流提前过零,这种现象称为“截流”,如图 2.10-24 所示,并产生截流过电压。

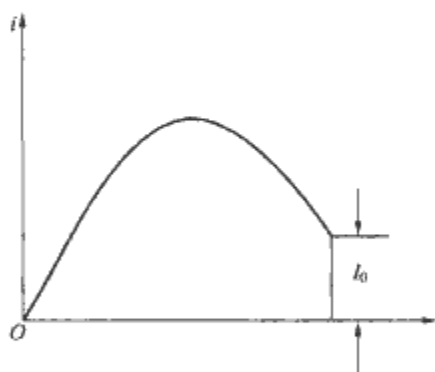


图 2.10-24 真空电弧截流波形图

截止电流 I_0 主要决定于触头材料,也与分断电流有关。理论分析与试验结果表明,当分断电流大于数百安(大约在 250A 左右)时,基本上不存在截流过电压。另外,试验结果表明,当触头材料截止电流小于 1A 时,不会对负载形成危险的操作过电压,此时不需要加装过电压吸收装置。

7.3.3 (低压)真空接触器结构与性能特点

(1) 真空接触器触头密封在真空容器中,其分断性能不受外部环境和气候条件的影响。同时,真空电弧不外露,不会污染环境,是一种理想的环保电器。

(2) 真空接触器触头在正常工作中不存在氧化问题,其触头一般不用银,是理想的节银电器。但是,真空接触器触头除了有较好分断性能、抗熔焊能力和导电性能外,应有良好耐磨损性,同时应有低截止电流(小于 1A)和低含气量。

(3) 真空接触器反力特性十分陡峭,一般采用直流磁系统。由于真空灭弧室内外大气压差,使动触头在闭合方向受

轴向力,称为自闭力。当触头处于断开位置时,自闭力是吸力一部分。设真空接触器反力弹簧的压力曲线为 1,由于三相灭弧室自闭力的存在,使其反力下降到 2。当触头闭合后,自闭力不抵消反力,只是触头压力一部分,此时反力曲线仍为 3。所以真空接触器的实际反力特性由图 2.10-25 中曲线 2、3 组成。由于灭弧室自闭力的存在,真空接触器反作用弹簧力通常比空气式接触器大得多。

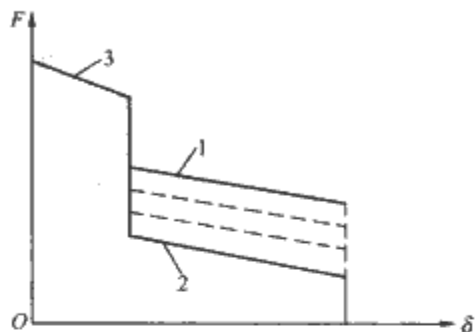


图 2.10-25 真空接触器反力特性

真空灭弧室自闭力

$$F = \frac{\pi}{3} (r^2 + Rr + R^2)$$

式中: r 为波纹管内半径; R 为波纹管外半径

除了自闭力因素外,真空接触器触头开距很小,因此真空接触器反力特性十分陡峭,如图 2.10-25 所示。电流等级越大,波纹管外径越大,自闭力也大,反力特性更陡,一般交流磁系统很难与其配合。通常大容量(250A 以上)真空接触器采用直流磁系统,小容量真空接触器可以用直流磁系统也可以用交流磁系统。

(4) 海拔高度对真空接触器性能的影响。当海拔高度超过 1000m 时,随着高度继续增加,大气压力的变化将对低压电器的许多性能带来影响。从影响外绝缘耐压水平看,真空接触器和空气接触器相似。而触头间的耐压水平、分断能力、电寿命等性能,由于真空接触器主触头密封在真空中,因此海拔高度的变化不会对上述性能产生影响。但是,真空灭弧室自闭力却随外界大气压力变化而变化,它将直接影响真空接触器吸力—反力特性配合,从而产生有影响的变化。海拔至 2500m 时,自闭力将减少 22% 左右,如发现最低吸合电压过高,可适当减小反力弹簧。当然,自闭力的减少也会引起触头压力减小,从而影响温升。

(5) 真空接触器电弧电压一般在 20V 左右,其电弧能量远小于空气式接触器。另外,低压真空接触器触头开距很小(一般为 $1.5\sim 2\text{mm}$),分断电流时,触头发射的金属蒸气在电流过零向四周扩散时,大部分沉积在触头表面。这些金属蒸气在真空中没有被氧化,像真空喷镀一样重新成为触头一部分,减小了触头磨损。因此,真空接触器具有很长的电寿命,特别是 AC-4 电寿命。

(6) 真空接触器最大分断电流一般在 8000A 以下,此时的电弧为扩散状电弧,弧根在触头表面快速移动。所以,真空接触器灭弧室触头结构比较简单,一般为圆形平面触头即能满足要求,而不需要采用横向磁场和纵向磁场触头结构。

另外,低压真空接触器耐压要求不高,灭弧室内屏蔽罩一般不需要考虑电场分布,也不需要悬浮电位,可以直接与静端盖板连接,与静触头保持同电位。因此,低压真空接触器真空灭弧室结构相对简单。

(7) 真空灭弧室真空度是低压真空接触器能否正常工作的必备条件。高压真空断路器灭弧室真空度一般要求在 $1.3 \times 10^{-4} \text{Pa}$ (10^{-6}mmHg) 以上。而低压真空接触器考虑到分

断电流与耐压要求相对较低,根据理论分析和试验结果表明,其真空度只要在 0.13Pa (10^{-3}mmHg) 以上就能正常工作。对真空度判别,一般可采用以下方法:

1) 真空灭弧室制造厂出厂检查和真空接触器制造厂进货验收,建议采用真空灭弧室真空度测试仪检查,检验灭弧室真空度应在 $1.3 \times 10^{-2}\text{Pa}$ (10^{-4}mmHg) 以上。如不具备条件,可以用工频耐压(磁路放电原理)法代替。

2) 真空接触器经长期存放,出厂以前和用户安装使用前建议用工频耐压仪进行耐压试验,要求耐压在 10kV 以上。如因触头表面产生闪络击穿,一般不允许超过 3 次。如发现外绝缘闪络,可适当降低试验电压。

3) 对于现场使用,建议定期用工频耐压法或用 5000V 绝缘电阻表检查。工频耐压一般应在 6000V 以上,绝缘电阻一般应在 $50 \sim 100\text{M}\Omega$ 以上。如能排除外绝缘影响,当绝缘电阻低于 $20\text{M}\Omega$ 时,建议更换真空灭弧室。

7.3.4 真空灭弧室结构

低压真空接触器真空灭弧室典型结构如图 2.10-26 所示。

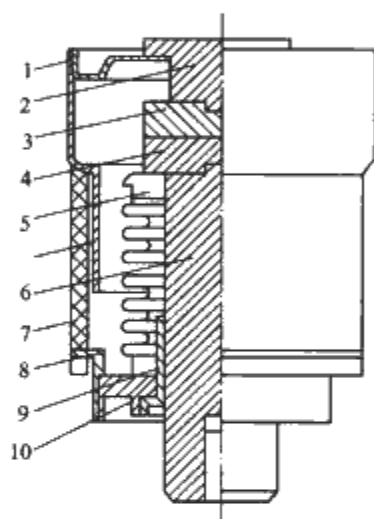


图 2.10-26 真空灭弧室结构图

1—上端盖板；2—静导电杆；3—静触头；4—动触头；
5—波纹管；6—屏蔽罩；7—动导电杆；8—绝缘外壳；
9—封接圈；10—导向套；11—下端盖板

真空灭弧室主要由以下功能部件组成:

(1) 气密绝缘系统。由绝缘外壳(陶瓷或玻璃)、封接圈和上、下端盖板组成,起密封、绝缘作用。

(2) 导电回路。由动、静触头,动、静导电杆组成。目前低压真空接触器触头一般采用低截流铜碳化钨。

(3) 屏蔽系统。图 2.10-26 显示的屏蔽罩与上封接圈为一个整体,也可以分成两个零件。其作用主要是防止金属蒸气喷溅到绝缘外壳内壁,防止破坏内绝缘。

(4) 波纹管。它使动触头在真空状态下运动成为可能,是保证真空灭弧室机械寿命的重要零件。在触头闭合位置应使波纹管处于微量压缩状态。在安装、调整、使用过程中应避免波纹管过量压缩。波纹管拉开和过量压缩都会影响波纹管寿命,其材料大多采用不锈钢。

7.3.5 真空接触器的优点和应用

(1) 真空接触器的优点。真空具有很高的耐压强度,且在电弧过零后,其绝缘强度恢复极快。因此,利用真空来熄灭交流电弧是一种十分理想的方法。由于真空电弧不外露、电弧压降小,且与回路电压基本无关,因此,与其他开关电器相比,真空接触器电弧能量最小,触头烧损小。因此,真空接触器容易做到高分断能力、寿命长,并具有节能、节材、防火、防爆、体积小、维护费用低、运行可靠和无污染等优点。

(2) 真空接触器的应用。早在 19 世纪,人们就想利用真空这种耐压强度高、绝缘强度恢复极快的介质来制造接通和分断电流的真空开关,但由于受到真空技术和触头材料提纯等因素的制约,直到 20 世纪 60 年代初才正式公布了英国 A. E. I 公司的世界第一个真空灭弧室专利。1965 年,真空接触器开始批量生产,该接触器的电压为 3000V ,工作电流 300A ,以后又发展 $1100/1400\text{V}$ 电压等级。英国是最早将真空接触器用于煤矿井下,控制起动频繁的大功率采煤机械的国家(1968 年),取代了空气式接触器。由于真空电弧能量小,特别适合重负荷的频繁操作,所以在使用中取得了明显的效果。

日本从 20 世纪 60 年代中期才开始研制真空接触器。日本吸取了英国的经验,在 70 年代初期和中期分别研制出系列真空接触器,其最大优点是采用低截流触头材料,截流值低于 1A 时不用镶嵌低熔点合金,且不需要过电压保护,又能满足可逆运行的要求,是低压真空接触器的一次新发展。这种接触器可适用于除煤矿以外的其他恶劣环境或重负荷频繁操作等条件下,如轧钢、采矿、化工、起重设备等。

我国 1985 年研制成功 250A 、 400A 、 600A 全国统一设计,规格较为齐全的第一代 CKJ5 低压真空接触器系列产品,并在煤矿、石油、冶金、化工、铁路、工业高频加热等行业获得广泛应用。国内真空开关厂于 20 世纪 80 年代中、后期引进了德国 AEG 公司的 EVS 系列真空接触器和真空灭弧室制造技术。目前,从德国引进的系列产品已投入批量生产,全部技术指标达到引进产品的水平,额定工作电压和 AC-4 条件下的电寿命等参数还超过引进产品。

与传统的空气式接触器相比,真空接触器分断时间短,故障率低,拥有更长的 AC-2、AC-4 使用寿命和更高的可靠性。因此,它可以替代传统的 CJ12、CJ24 系列转动式接触器。而在矿山、冶金、起重机械、化工、铁路牵引变电站、电力牵引机车、港口等重要场合的使用,特别是在操作频繁、使用条件恶劣、难以维护的场合替代其他空气式接触器,更能显示出它的优越性。

7.4 固态接触器

固态接触器(Solid State Contactor)是近年来新发展起来的一种按照交流接触器使用模式组装起来的固态继电器应用组件,在交流固态继电器 SSR(Solid state relays)的基础上,配装好散热器、防护罩、安装卡子等,组成一只功能完整的电流控制组件,可以方便地代替电磁式交直流接触器产品。所谓的固态继电器 SSR 是一种无触点通断电子开关,为四端有源器件。其中两个端子为输入控制端,另外两端为输出受控端,中间采用光电隔离作为输入、输出之间电气隔离(浮空)。在输入端加上直流或脉冲信号,输出端就能从关断状态转变成导通状态(无信号时呈阻断状态),从而控制较大负载。整个器件无可动部件及触头,可实现相当于常用的机械式电磁继电器一样的功能。

传统的电磁式交直流接触器都是有触头的电磁机构,有触头会产生火花和磨损,噪声也大。为了克服这些不足,交直流接触器的发展趋势之一是采用电力电子元件构成半导体接触器。固态接触器发展到大电流、高反压、高可靠性后,将在电力系统、同步补偿等高速运用场合大有作为。

固态接触器不仅可实现目前接触器的功能,还能进一步发展多功能(或智能)接触器,同时避免电磁式接触器的一系列缺点(触头易损坏、产生火花、维护工作量大等)。由于固态接触器无触头地通断,没有电弧,没有烧损,工作时

无噪声,可在易燃易爆的环境下安全工作。在保持额定的工作条件下,固态接触器几乎可无限制地使用,可应用于对噪声敏感的环境,如医院、办公室;使用于对电火花敏感的环境,如纺织厂、面粉厂、化工厂、包装容器(PET)瓶企业等。固态接触器使用的开关元件为电力半导体器件,必须安装熔断器来实施短路保护,而在挑选配套的熔断器时应选用高速型。

要实现利用电力电子元件构成无触头的固态交直流接触器,也存在很多困难。固态接触器相对于机械接触器的主要缺点是:

- (1) 功耗大。
- (2) 发热比较多。
- (3) 过载能力差。
- (4) 没有可靠的电气隔离。
- (5) 有波形畸变。

(6) 保护问题(电力电子元件的过载能力目前远远不如电磁接触器)。

此外,固态接触器的触头数相对较少,虽然可以扩充,但扩充后的体积、不同触头之间的相互干扰等方面的问题又产生了。所以,在许多场合下,固态接触器不能代替机械接触器。

为了克服上述的不足,市场上还发展了一种将晶闸管与交流接触器并联运行的复合式开关。这种产品与交流接触器、晶闸管或固态接触器等开关比较有很大的技术优势,它汲取两者的优点为一身,同时克服两者单独运行的不足,在接通和断开的瞬间保证零电流投切,无涌流;而在正常接通期间又具有接触器低功耗的优点,无谐波注入。

8 发展趋向

8.1 接触器的发展趋向

随着电子技术、高新材料的不断发展,接触器技术向智能化、模块化、小型化、高性能、节能节材、环保、安装调试方便、多品种等方向发展,其发展特征主要从材料、技术特点和功能等几方面体现。

(1) 材料方面。

1) 采用环保材料。触头(电工合金材料)、塑料(绝缘件)等均采用无公害的绿色环保材料。欧盟的 RoHS 指令对镉(Cd)、铅(Pb)、汞(Hg)、六价铬(Cr^{+6})、多溴联苯(PBB)和多溴联苯醚(PBDE)等6大公害材料有严格的限制。

2) 全塑化。底座、躯壳、灭弧罩3段全部采用强度好、耐弧性能优良的工程塑料。为了符合欧盟的 WEEE 指令,以前使用的不可回收的热固性塑料,现在有逐渐被可回收的热塑性塑料代替的趋势。

总之,从材料角度出发,今后的产品更注重环保,即绿色产品。环保包括塑料材料、触头材料、制造工艺过程以及使用过程等多方面的环保。欧盟指令、IEC 标准都正式列入了有关环保要求的条款。因此,今后的产品更强调环保,不仅关系到产品的水平和层次、人身安全,同时与社会的和谐、自然生态、人文风俗等息息相关。

(2) 技术特点方面。

1) 高防护等级、安全性能,小型化,结构模块化,更具人性化且方便维修和保养。

2) 更注重与系统中其他元件的配套性与协调性。新一

代接触器采用系统概念与电动机保护器、熔断器开关、热继电器、电子式过载继电器等元件配合使用,同容量等级宽度相同,便于直接连接,结构紧凑、安装方便。

3) 智能化。将人工智能等技术引入接触器的控制中,保证大容量交流接触器实现零电压接通、无弧或少弧分断,提高其性能指标,实现接触器控制技术的新突破。接触器的智能化也是控制论、信息论、系统论、计算机科学、神经生理学、心理学、数学、哲学等科学相互交叉渗透的产物。近年来,专用集成电路 ASIC 技术的飞速发展,将 ADC、DAC 以及运算放大器、比较器等模拟电路、微处理器、DSP 等功能部件以及 SRAM 等大规模的存储器集成在芯片中。DSP 开发工具、应用软件以及 DSP 平台的发展,也对接触器的人工智能化起到了促进作用。

4) 线圈节能运行。采用低电压小电流的直流保持电流,弥补了交流电的不足。因为直流电在磁路中是恒磁,所以不存在反向充磁、涡流及分磁环的损耗。与交流电运行比较,直流运行的接触器总功率是交流运行总功率的5%左右,几乎避免了铁心上的全部损耗,节电率高,且避免了运行时的噪声。

5) 向多品种发展也是潮流之一。很多特殊场合如煤矿或大容量接触器采用真空技术。电力系统、同步补偿等高速运用场合常采用固态接触器。固态接触器逐步向全系列发展,但由于固态接触器相对于电磁式接触器存在功耗大、发热高、过载能力差、没有可靠的电气隔离、有波形畸变等缺点,因此在许多场合,固态接触器不能完全代替电磁式接触器。随着城市轨道交通的大力发展,高性能直流接触器的应用也越来越广泛。

(3) 功能方面。

1) 控制功能。控制电路带延时通断功能并可现场设定,提高系统的运行性能。

2) 通信功能。带现场总线接口便于组网。接触器的控制单元内置专用微处理器(MCU/MPU),通过对三相主回路、线圈控制回路的电流和电压信号进行数据采集处理,动态优化接触器吸合、保持、分断等基本操作过程,实现无弧或少弧分断。同时兼容电动机保护器对电动机工作状态进行监控,常规接触器与热继电器组合而产生了过载和断相保护功能。智能接触器具有数字计算和数字通信能力,微处理器在提高信号的测量、控制和传输精度的同时,丰富了控制信息的内容。工业现场的多台控制电机的智能接触器组成控制器网络,与监控计算机通信,完成参数设置、数据查询、故障诊断等操作。现场总线(Field bus)作为一种数字化通信系统,采用可进行简单连接的双绞线、同轴电缆、光缆、数字微波、红外线、电力线等作为总线,成为生产现场智能接触器群和监控计算机之间的纽带,使之进行双向、串行、多节点的数字通信,实现数据传输与信息交换。网络节点具有路由和组网功能,支持多种总线通信协议。

8.2 起动器的发展趋向

起动器技术发展方面,随着接触器、电动机保护器、电子技术等方面的进步,主要向智能化可通信及多品种方向发展,如软起动器、多功能集成的控制与保护开关电器(CPS),并随着这些产品的技术不断完善,最终成为新的大类电器。

第 11 章 电 动 机 软 起 动 器

1 前 言

1.1 软起动器的定义和适用标准

根据国标 GB 14048.6—1998 (IEC 947-4-2: 1995, IDT)《低压开关设备和控制设备接触器和电动机起动器第 2 部分: 交流半导体电动机控制器和起动器》的规定, 交流半导体电动机控制器 (AC Semiconductor motor controller) 是为交流电动机提供起动功能和截止状态的半导体开关电器。它有 3 种型式: ① 型式 1 称为半导体电动机控制器 (Semiconductor Motor Controller), 其起动功能可以包括制造厂规定的任何一种起动方法, 其控制功能包括对电动机的操纵、可控加速、运行或可控减速, 也可以提供全电压运行; ② 型式 2 称为软起动半导体电动机控制器 (Semiconductor Soft-start Motor Controller), 其起动功能仅限于控制电压和 (或) 电流上升, 也可包括可控加速, 附加的控制功能仅限于提供全电压运行, 也就是说型式 2 的控制器没有电动机运行和停车时的控制功能; ③ 型式 3 为直接半导体电动机控制器 (Semiconductor Direct on Line Motor Controller), 其起动功能仅限于全电压直接起动, 电压的上升不受控制, 附加的控制功能仅限于提供全电压运行, 实际上它是一种半导体组成的接触器。在交流半导体电动机控制器上配备适当的过载保护装置, 就称为半导体电动机起动器。

但是在美国的 UL508 标准中则称之为固态软起动器 (Solid State Soft Starter), 这是美国通常称半导体器件为固态器件的缘故。事实上, 在中国一般工程技术人员也习惯称半导体电动机起动器为固态软起动器, 所以本章也沿用这个说法。

1.2 异步电动机的转矩、电流与转速的关系

交流异步电动机因其结构简单、工作可靠、效率高、价格便宜得到广泛应用。其工作原理是基于气隙旋转磁场与转子绕组中感应电流相互作用产生电磁转矩, 从而实现电能—机械能一体化转换的一种交流电动机。但是这种电动机的定子电流、转矩和转速间是非线性关系, 如图 2.11-1 所示。

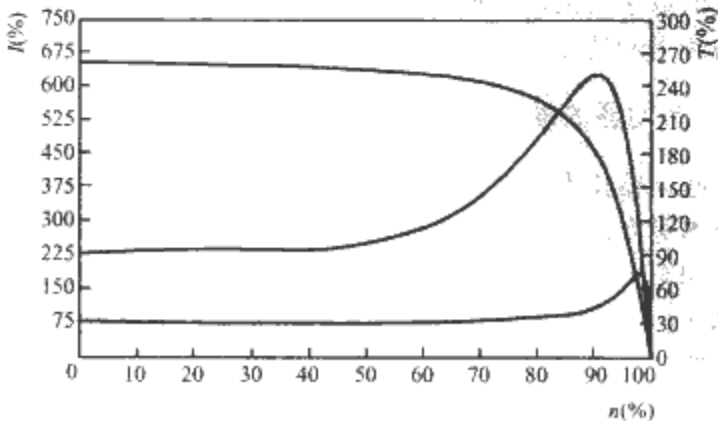


图 2.11-1 异步电动机在全电压下的
电流—转速和转矩—转速曲线

当电动机静止时, 转子与定子旋转磁场间的相对转速最大, 转子内感应电势最大, 所以起动电流很大, 通常会达到电动机额定电流的 5~8 倍。而此时电动机的功率因数却很低, 所以电动机的有功功率也很小, 而电磁转矩并不大。电动机在静止时的电磁转矩称为堵转转矩或起动转矩, 根据各种设计, 堵转转矩可能是 0.6~1.6 倍额定转矩。随着转速的升高, 电动机的功率因数逐渐增大, 电流逐渐减少, 转矩则逐步增加。在某一转速时, 电动机的电磁转矩达到最大值, 称为最大转矩。此后, 转速再增加时, 转矩则会减少。交流异步电动机的最大转矩通常会 是额定转矩的 1.8~2.8 倍。

1.3 异步电动机直接起动存在的问题及解决方法

1.3.1 异步电动机直接起动存在的问题

由交流异步电动机在全压下的转矩曲线和电流曲线可见, 如果直接将电动机接至电网来起动它 (全压起动) 会带来了一系列的问题。

(1) 对电网的冲击。过大的起动电流流过电网的阻抗会产生过大的线路压降, 使连接该电动机的供电母线都产生快速、短时的电压波动, 该电压波动将影响到系统中其他用电设备的正常工作。例如引起同步电动机振荡, 使电子设备和测量仪器无法准确工作, 使照明灯光闪烁, 使一些生产机械产生速度波动, 影响产品质量。表 2.11-1 列出了电压跌落对一些设备的危害。

表 2.11-1 电压跌落对一些设备的危害

设备名称	电压跌落对该设备的影响后果
制冷设备控制器	当电压低于 80% 时, 控制器动作, 将制冷电动机切除, 导致生产损失
集成芯片测试仪	当电压低于 85% 时, 测试仪停止工作
可编程控制器 (PLC)	当电压低于 81% 时, PLC 停止工作; 一些 I/O 设备, 当电压低于 90%、持续时间仅几个周波, 就会被切除
直流传动	当电压低于 80% 时, 直流传动就被切除
交流调速传动	当电压低于 70%、持续时间超过 6 个周波就被切除; 对一些精细加工业中的调速传动, 当电压低于 90%、持续时间超过 3 个周波时就会被切除
接触器	电压低于 70% 就断开
计算机	当电压低于 60%、持续时间超过 12 个周波时, 会影响计算机工作

因此, 国家标准和国际标准都对电网的瞬时电压降有严格限制, 不允许压降超过 15%。然而, 中国很多用户常常用扩大供电电网的方法来应对电网压降不得超过 15% 的规定。例如 1 台 6kV 800kW 的电动机驱动 1 台水泵, 其堵转电流 $I_{st}=6.5I_{rat}$, 堵转转矩 $T_{st}=0.9T_{rat}$, 若供电变压器的阻抗电压为 7.5% (标准值), 要直接起动它, 同时供电变压器端电压降不超过 15%, 在不带其他负载的情况下, 变压器容量也必须大于 3716kVA, 即为电动机容量的 4.65 倍。这种方法造成中国各企业的电网负荷率很低, 往往都不到 50%。既造成供电设备投资浪费, 又造成电能浪费和运

行费用大增。

(2) 对电动机本体结构的冲击。两根通电导线间的电力与该两根导线中电流的乘积成正比, 因此, 电动机直接启动时, 电动机绕组中通过 7~8 倍额定电流的启动电流, 就会在绕组间、绕组和铁心间产生比额定工作时大 49~64 倍的电力, 使电动机各部件受到过大的应力。频繁承受这么大的应力会加速转子笼条、端环断裂和定子端部绕组绝缘磨损, 还会造成绕组过热, 加速绝缘老化。这种力和热效应都会影响电动机寿命。

(3) 对生产机械的冲击。电动机直接启动产生的过大转矩, 使被拖动的机械设备产生巨大的应力, 造成传动齿轮损伤, 或者风机、压缩机、水泵的叶片受到冲击, 缩短使用寿命。对于带式输送机, 传动带的价值约占带式输送机总价值 3/4。实际运行经验表明, 影响输送机传动带使用寿命的主要因素是电动机启动时的冲击转矩引起传动带张力剧增, 严重时甚至拉断传动带, 所以, 输送机电动机不应当采用直接接电网启动。对于水泵系统, 则会造成管道、阀门的损伤, 缩短使用寿命。

(4) 有些生产过程不允许速度突变。例如啤酒瓶罐装线之类的生产线, 突然的加减速会使啤酒瓶翻倒, 造成生产损失。

1.3.2 解决交流异步电动机启动的方法

为了解决交流异步电动机启动时电流过大带来的问题, 有 4 类启动方法。由式 $I_{1st} \propto U_1$, 可见 (I_{1st} 是启动时流入电动机的电流), 降低电动机在启动时的端电压, 其启动电流将随之成正比减少。由 $T_{st} \propto U_1^2$ 可见, 电动机的启动转矩则随电压的平方减少。

异步电动机在改变端电压时的机械特性如图 2.11-2 所示。

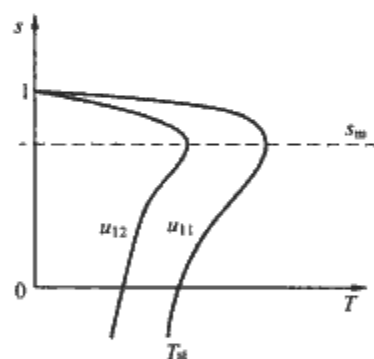


图 2.11-2 异步电动机在改变端电压时的机械特性

改变电动机定子绕组电压的方法有许多种, 例如使用星—三角变换, 使用自耦变压器降压, 以及使用基于晶闸管交流无级调压电路的固态软起动器等。

(1) 使用星—三角启动。如图 2.11-3 所示为笼型异步电动机使用星—三角启动的主电路。首先使接触器 3KM 闭合, 然后闭合接触器 1KM, 异步电动机定子绕组接成星形开始启动。经过一段时间之后 (时间继电器的延时可根据电动机的启动时间调整), 使接触器 3KM 断开, 然后闭合接触器 2KM, 这时, 电动机定子绕组接成三角形运行, 起

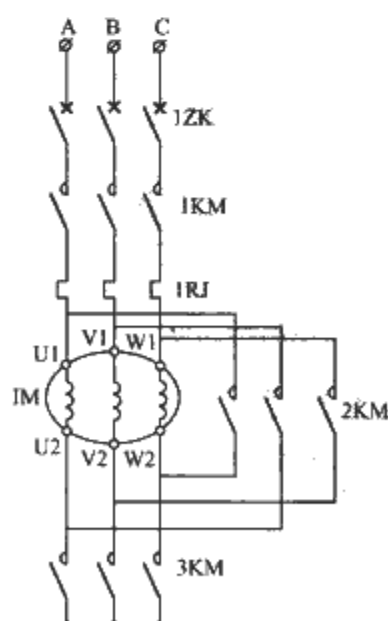


图 2.11-3 笼型异步电动机使用星—三角启动的主电路

动完毕。

使用这种启动方法的异步电动机其每相定子绕组的两端都必须引到接线端上, 并且在正常运行时三相绕组是接成三角形的, 而只在启动之初接成星形, 待转速接近额定转速时再改接成三角形。

启动时三相绕组接成星形, 每相绕组的电压为三角形接法时的 $1/\sqrt{3}$, 故启动转矩为全压启动转矩的 $1/3$ 。

$$T_{stY} = T_{st} / 3$$

三角形接法的线电流为每相绕组电流 (即相电流) 的 3 倍, 而星形接法的线电流与每相绕组电流相同, 但此时星形接法的每相绕组电流为三角形接法每相绕组电流的 $1/\sqrt{3}$, 也就是三角形接法的线电流的 $1/3$ 。

交流异步电动机使用星—三角启动时的启动电流和启动转矩曲线如图 2.11-4 所示。

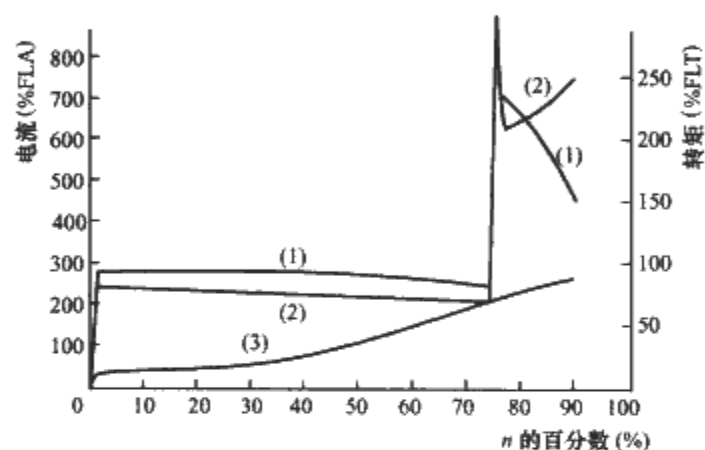


图 2.11-4 交流异步电动机使用星—三角启动时的启动电流和启动转矩曲线

曲线 (1) — 启动电流; 曲线 (2) — 启动转矩;
曲线 (3) — 负载转矩

由图 2.11-4 所示的曲线可见这种启动方法在星形转换成三角形时会造成更大的冲击电流。这是因为断开 3KM 以后, 电动机存在剩磁, 会在三相绕组中感应出电动势。当 2KM 闭合时外加电压与这个感应电动势在相位和频率上都不会一致, 从而会造成冲击电流, 这个冲击电流甚至达到电动机额定电流的 15 倍, 只是持续时间较短而已。为了消除这个冲击电流, 美国的做法是在从星形接法转为三角形时在其中串入限流电阻, 然后把限流电阻用另一个接触器旁路掉。星—三角启动的另外一个缺点是它只有一个固定的降压等级, 故其启动转矩并不能与各种负载转矩相配合。因此, 它只用于很小功率电动机的启动。

(2) 使用自耦变压器降压启动。如图 2.11-5 所示为交流异步电动机采用自耦变压器降压启动主电路。感应电动机 IM 启动时, 先闭合接触器 2KM 和 3KM, 自耦变压器 TA 通电, 电动机 IM 接到自耦变压器的抽头上, 开始启动, 经过一段延时, 电动机速度达到额定转速, 断开接触器 3KM, 再闭合接触器 1KM, 然后再断开接触器 2KM, 电动机工作于全压状态。

设自耦变压器中间抽头的电压为 U_{12} , 自耦变压器每相绕组总匝数为 W_1 , 抽头至零点间的匝数为 W_{12} , 则 $U_{12}/U_1 = W_{12}/W_1$ 。电动机的启动转矩下降为

$$T_{stA} = \left(\frac{U_{12}}{U_1} \right)^2 T_{st}$$

式中: T_{st} 为全压启动时的启动转矩。

而电动机在启动时, 流入电动机的电流为 $I_{1st} = U_{12}/U_1$, 自耦变压器的输入电流则为 $I_{1st} = (U_{12}/U_1)^2$ 。

采用自耦变压器降压启动, 常常选用的降压百分数

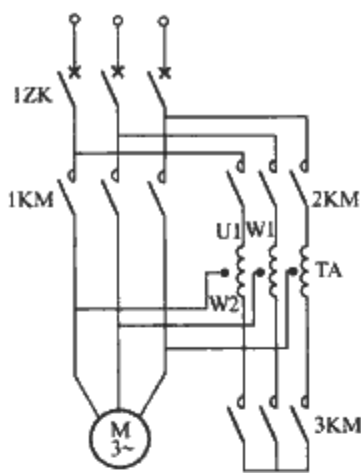


图 2.11-5 交流异步电动机采用自耦变压器降压启动的主电路

（电动机启动时的电压与额定电压之比）为 80%、65% 和 50%，对应的启动转矩与全压启动转矩之比分别为 64%、43% 和 25%，对应的启动电流与全压启动电流之比分别为 64%、43% 和 25%。交流异步电动机采用自耦变压器降压启动时（抽头电压为 50%）的电流和转矩曲线如图 2.11-6 所示。

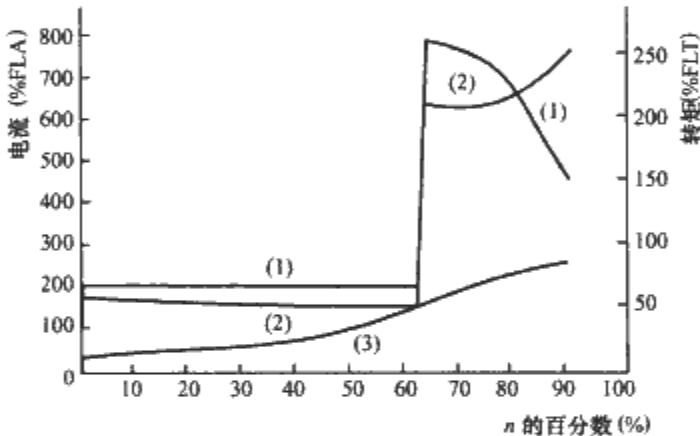


图 2.11-6 交流异步电动机采用自耦变压器降压启动时（抽头电压为 50%）的电流和转矩曲线
曲线(1)—启动电流；曲线(2)—启动转矩；
曲线(3)—负载转矩

采用自耦变压器的缺点是通常只有一挡抽头，如果采用多挡抽头，则会增加许多接触器。所以这种方法的启动转矩也不能与负载转矩相配合。

(3) 固态软起动器启动。如图 2.11-7 所示为采用固态软起动器启动交流异步电动机的电路，固态软起动器实质上是一个晶闸管调压器，其调压工作原理将在第 11.2 节说明。晶闸管调压电路能无级调节输出电压，使电动机平滑启动。当启动完毕时，固态软起动器的晶闸管全导通，即输出电压等于电网电压，因此，可以不用旁路接触器将起动器旁路。如果不需要软起动器作其他控制（例如功率因数优化控制等），通常使用旁路接触器将其旁路。这是因为晶闸管压降比接触器触点压降要大，每个晶闸管导通时的压降约 1V，会产生损耗。

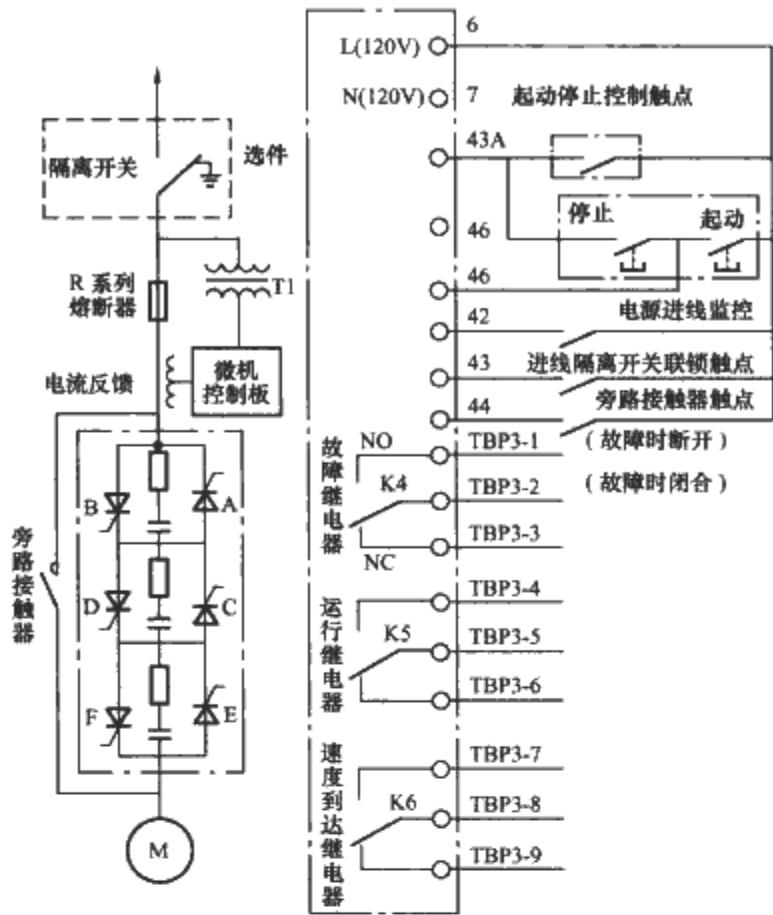


图 2.11-7 固态软起动器启动交流异步电动机

1.3.3 低压交流异步电动机几种启动方式的比较

低压交流异步电动机的几种启动方式比较见表 2.11-2。由表可见，固态软起动器将是今后推广应用的方向。

1.4 软起动器的分类

20 世纪 70 年代晶闸管制造技术已趋成熟，大功率高压的晶闸管也已批量生产，利用晶闸管交流调压技术制造的软起动器开始推广。此后美国宇航局工程师诺瓦提出了用软起动器降低空载电动机电压达到节能的专利技术，从而发展了具有功率因数控制技术的软起动器。这种软起动器在电动机达到正常转速后，能根据负载大小对软起动器输出电压进行调节，以减少电动机的无功电流，实现节能运行。再后来又采用微电脑代替模拟控制电路，发展成现代化的智能化固态软起动器。目前，世界上许多电气公司都生产固态软起动器，技术水平和品种繁多，以满足各种档次和和各种负载的要求。大致可按以下几个方面来分类。

1.4.1 按晶闸管三相调压主电路的形式分类

通常三相电动机的软起动器，可以在每相上串联晶闸管调节加在电动机上的电压，这就是三相控制式，也可以只在其中两相串联晶闸管控制加在电动机上的电压，这就是二相控制式，它们的工作原理见第 11.2 节。二相控制是三相调压电路仅在两相中使用了晶闸管，因此三相电流十分不对称，有很大的零序电流，如图 2.11-8 所示，并导致电动机输出转矩小，电动机发热严重，通常只在小功率（5.5kW 以下）软起动器中使用。这类产品由于功能简单、价格便宜、体积小而进入市场，但从电网质量标准来说是不允许的。

表 2.11-2 低压交流异步电动机的几种启动方式的比较

启动方式 参 数	全压启动	星—三角启动	自耦变压器 降压启动	定子串电阻 降压启动	定子串电抗 降压启动	转子串电阻 降压启动	固态软起动器 降压启动
启动电压与额定 电压之比 U_{st}/U_1	100%	$\alpha (=58\%)$	$\alpha (=80\% \sim 50\%)$	α	$\alpha (=50\% \sim 37.5\%)$	α (常用多级)	α (连续变化)

续表

启动方式 参 数	全压启动	星—三角启动	自耦变压器 降压启动	定子串电阻 降压启动	定子串电抗 降压启动	转子串电阻 降压启动	固态软起动器 降压启动
启动转矩与全压 启动转矩之比 T_{st}'/T_{st}	100%	$\alpha^2(=33\%)$	$\alpha^2(=64\%\sim25\%)$	α^2	$\alpha^2(=25\%\sim14\%)$	近似额定转矩	α^2 (连续变化)
启动电流与全压 启动电流之比 I_{1st}'/I_{1st}	100%	$\alpha^2(=33\%)$	$\alpha^2(=64\%\sim25\%)$	α	α	α	
启动级数	1	2	2、3 或 4	2 或 3	2	2~5	连续无级
适用场所	高低压电 动机	定子具有 6 个出线端的低 压电动机	高低压电动机	低压电动机	高低压电动机	高低压绕线型 电动机	高低压电动机
特 点	启动方法简 便, 启动转矩 冲击大, 启动 电流大, 电网 压降大, 对电 动机和机械设 备的冲击也大	启动电 流 小, 启动转矩 小, 从星形切 换到三角形接 法时会有冲击 电流。只适用 于小容量电 动机	启动电流较小, 启动转矩较大, 切 换时会产生冲击电 流。级数多时, 设 备体积较大	启动电流较 大, 启动转矩 较小, 启动过 程中电阻上电 能损耗大, 重 复启动频率较 小, 体积较大	启动电流较大, 起 动转矩较小	启动电 流 较 小, 启动转矩较 大, 多级启动时 设备比较大	启动电流和启动 转矩可以根据负载 情况调节, 达到平 衡启动, 又由于采 用微电脑控制, 可 以增加许多新功 能, 如自诊断、测 量等

二相控制的产品有 SIEMENS 的 Sirius 系列、Schneider 的 LH4N2 系列、ABB 公司的 PSS 系列、Allen Bradley 的 SMC2 系列以及 Aucom 的 CSX 系列。其中, 新西兰 Aucom 公司的 CSX 系列采用特殊专利技术——Equi-Vec™ 平衡矢量控制技术, 可以平衡输出波形, 使波形对称 (见图 2.11-9)。

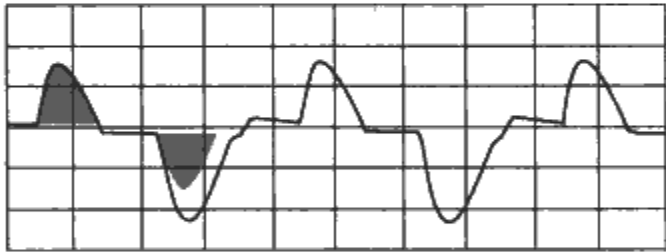


图 2.11-8 二相控制的软启动电路
正负半波电流不对称

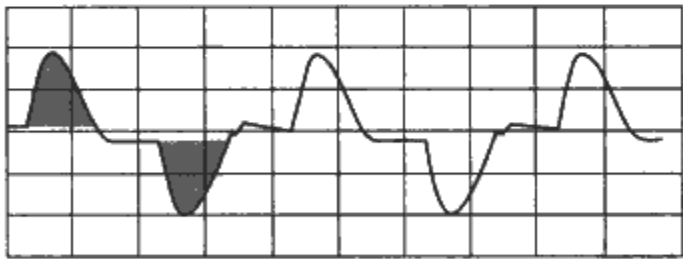


图 2.11-9 Aucom 的 CSX 系列采用特别控制技术,
使得正负半波电流对称

Aucom 的 CSX 系列软起动器除了是同类产品中性能最好的, 体积也是最小的。因此, 如果要想节约投资而采用简易的二相控制软起动器, Aucom 的 CSX 是最佳的选择。

1.4.2 按软起动器的启动控制方式分类

固态软起动器经过 20 多年的发展, 其启动电动机的控制方式也有了很大的进步, 从最初的电压斜坡启动方式发展到最新的转矩闭环控制方式主要经历了三个阶段:

(1) 早期的电压斜坡启动方式, 包括带突跳电压脉冲的电压斜坡控制; 有两个电压斜坡可选择的控制方式。

(2) 第 2 代产品——电流闭环控制的斜坡启动方式, 包

括带突跳电流脉冲的电流斜坡启动控制。

(3) 第 3 代产品——转矩闭环控制的斜坡启动和停止方式, 它是采用一定算法, 及时计算电动机的转矩作为反馈控制 (有些厂商的产品只是设置了几条转矩—转速曲线供水泵停机用, 这种方法局限性很大, 不能归在转矩闭环控制类产品中)。

1.4.3 按软起动器的保护功能分类

(1) 不带电动机保护的固态软起动器, 例如 ABB 公司的 PSS 系列和 AB 公司的 STC 系列、SMC-2 系列 (附加了断相保护) 固态软起动器, 这些软起动器在应用时, 往往外加热继电器作过载保护。

(2) 带基本的电动机保护的固态软起动器, 例如 ABB 公司的 PSD 系列和 PSDH 系列固态软起动器, 附加有电子式过载继电器。

(3) 带完善的电动机保护和系统保护的固态软起动器, 例如美国 Rockwell 公司的产品, 不仅有各种电动机过载曲线可供选择, 对电动机作最佳过载保护, 还有过电流、欠电流、电流不平衡、接地电流、过电压、欠电压保护, 相序选择保护, 频率过低和过高保护, 电动机发热积算保护和启动次数限制保护等, 还有软启动装置本身的保护, 例如过温保护、CPU 失效保护、晶闸管短路保护等。

1.4.4 按软起动器的电路监控计量功能分类

(1) 不带电路计量监控功能, 大多数低端、中低端的软起动器均属于此类。

(2) 只带基本的电流、电压测量和监视的固态软起动器。

(3) 带有完善的电路计量监控功能的固态软起动器。可以监测电路的各相电流、电压、功率因数、有功功率、无功功率、电能用量等, 以及各种运行状态, 例如启动次数、间隔时间, 在配备 RTD (电阻温度检测单元) 的情况下可以监控电动机绕组、轴承温度等。

1.4.5 按是否配置通信功能分类

- (1) 没有通信功能, 低端产品没有通信功能。
- (2) 带有基本的串行接口 RS-232 或 RS-485。
- (3) 带有通信总线, 例如 DeviceNet、Modbus RTU 或

Profibus, 通信编程很方便。

根据以上几个方面功能的丰富程度可以把固态软起动器市场划分为高端、较高端、中端和低端市场。可以看出, 占据高端市场的代表产品有美国 Rockwell 公司的系列固态软起动器, 它们采用电流闭环控制和转矩闭环控制, 具有十分完善的保护功能和测量监控功能, 带有通信总线; 较高端市场的产品代表有新西兰 Aucom 公司的 EMS2 系列固态软起动器, 以及加上各种可选配件的 ATS48 系列 (Schneider 公司) 固态软起动器; 大量品牌的固态软起动器则占据了中间和低端市场。

1.4.6 按照国标 GB 14048.6 有关规定分类

按照国标 GB 14048.6 有关规定, 目前市场所见的软起动器应属于 AC-53b, 即控制笼型电动机的, 并在运行时短接控制器 (需使用旁路接触器)。而属于 AC-52a 和 AC-52b 类的, 只有国外一些公司的系列软起动器用于控制绕线转子异步电动机, 并在运行时使用旁路接触器。此外, 还有用晶闸管控制的可逆运行的软起动器, 以及带直流制动的软起动器, 带直流制动功能并且用晶闸管控制可逆运行的软起动器, 以及用于同步电动机的不可逆运行控制的软起动器系列。

在电动机保护和监控方面也日益完善, 可以监测电流、电压、功率因数、有功功率、无功功率和视在功率、电能计量等; 可以对电动机作各种保护, 例如过载、过电流、电流不平衡、温度、过电压、欠电压、堵转、接地等; 带有通信总线, 可实现与 PLC、电脑等的通信。目前, 世界上许多电气公司都生产半导体电动机控制器或者软起动半导体电动机控制器, 其中, 国外品牌技术最为领先, 品种最为齐全。其低压半导体电动机起动器额定电压为 208~1140V, 额定电流为 7.6~1500A, 过载能力为 500% 额定电流 30s。半导体电动机起动器额定电压为 2300~15000V, 额定电流为 19~2000A, 过载能力为 500% 额定电流 30s, 并具有可控制交流异步电动机、绕线式电动机、双速单绕组电动机、双速双绕组电动机以及同步电动机的控制器。

2 软起动器结构与工作原理

2.1 软起动器的基本电路结构

如图 2.11-10 所示为上海电科公司的 VRQ 系列固态软起动器, 图 2.11-10(a) 为固态软起动器的控制回路接线, 图 2.11-10(b) 为固态软起动器的外部控制接线。由图可见, 三相电源由 L1、L2、L3 输入, 经过晶闸管 VTH1~VTH6 构成的三相交流调压电路和 3 个电流互感器 (TA1~TA3)。在晶闸管功率组件旁边并联有接触器 (称为旁路接触器)。固态软起动器所有起动、停止控制功能, 保护、计量和监控功能均由图中的主控板完成。主控板接受从晶闸管上来的三相电源电压和电流互感器来的三相电流信号, 从而检测到固态软起动器的三相工作电压和工作电流, 经过快速傅里叶变换, 可以计算出电路的频率、功率因数、视在功率、有功功率、无功功率和实际消耗的电能。主控板根据外部起动、停止命令, 可以适时给出晶闸管的触发信号, 使之输出按程序预先设置好的规定电压。

由图 2.11-10(b) 可见, 用户只需接上起动按钮 START 和停止按钮 STOP (称这种接法为三线控制方案), 起动时, 软起动器的晶闸管输出电压按预设程序逐渐增大, 直到电动机起动至额定转速, 它的速度到达继电器 (BYPASS) 吸合, 使旁路接触器接通, 其主触头便将晶闸管旁路, 把三相电源直接加到电动机上。因为晶闸管全导通时, 在管子两端

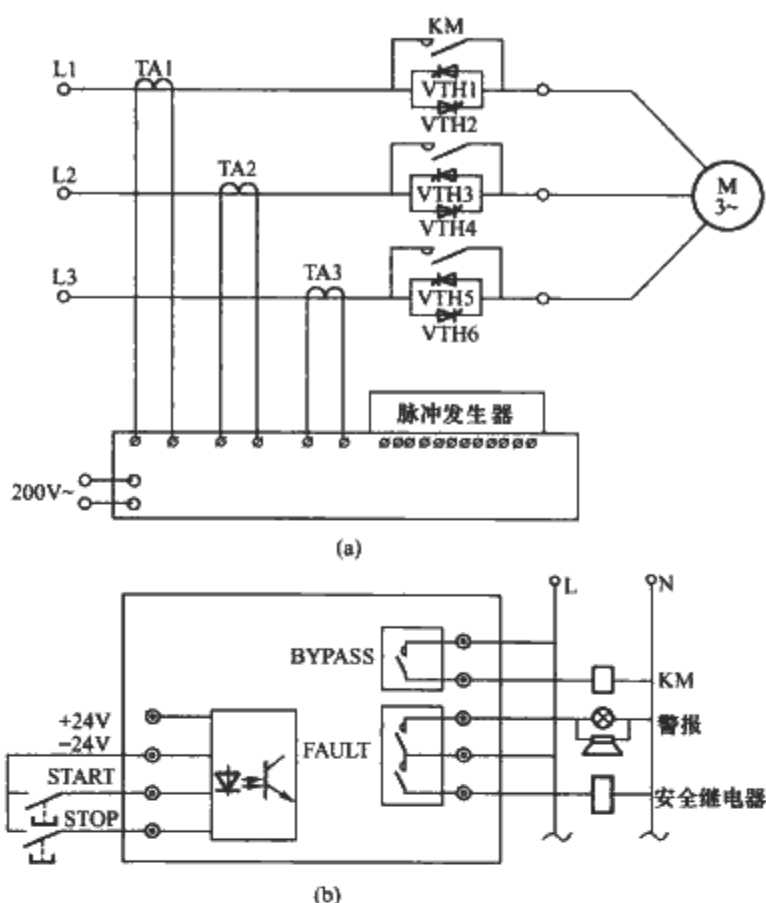


图 2.11-10 上海电科公司的 VRQ 系列固态软起动器
(a) 固态起动器主要电气部件及其接线;
(b) 固态软起动器外部控制接线

仍会有 1.5V 左右的压降, 使用旁路接触器可以减少电路压降及晶闸管发热。当软起动器检测到任何异常情况, 主控板上的故障继电器 (FAULT) 便会动作, 使前级断路器跳闸, 切断电源, 同时断开旁路接触器, 使晶闸管截止。

该系列软起动器的控制板主要是由微型电脑芯片 (CPU) 及其外围数字电路构成, 提供液晶显示器操作键盘, 它通过扁平电缆与主控制器相连。操作键盘可以装在成套装置的柜门上。软起动器的主要执行单元是一个三相晶闸管交流调压电路, 下面就来介绍该电路的工作原理。

2.2 单相交流调压电路原理

如图 2.11-11(a) 所示为一个单相交流调压电路。其中, 电源电压 $u_s = 2U_0 \sin \omega t$, 应用两个晶闸管 VTH1 和 VTH4 反并联来控制加在负载 RL 上的电压。图 2.11-11(b) 所示为负载上的电压波形 u_{out} 。

图 2.11-12 的曲线只在电路中仅有 VTH1 晶闸管时成立, 当有 VTH2 晶闸管存在时, 情况就不同了, 图 2.11-11(a) 所示电路的 γ 与 α 的关系曲线如图 2.11-12 所示。

下面分别按 $\alpha = \varphi$, $\alpha > \varphi$ 和 $\alpha < \varphi$ 三种情况来讨论:

(1) $\alpha = \varphi$ 。由式 $\sin(\gamma + \alpha - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi)e^{-\frac{R}{\omega L}\gamma}$ 可见, $\sin \gamma = 0$, $\gamma = 180^\circ$ 。它表示在 $\omega t = \alpha$ 时触发导通 VTH1 晶闸管, 在 $180^\circ + \alpha$ 时刻, VTH1 晶闸管关闭, 这时又触发导通 VTH4 晶闸管; 在 $360^\circ + \alpha$ 时 VTH4 晶闸管关闭, 接着又触发导通 VTH1 晶闸管, 如此反复。于是在负载上得到连续的正弦波电压 $U_L = U_s$ 。

(2) $\alpha > \varphi$ 。由式 $\sin(\gamma + \alpha - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi)e^{-\frac{R}{\omega L}\gamma}$ 的右边, $\sin(\alpha - \varphi)e^{-\frac{R}{\omega L}\gamma} \geq 0$, 所以

$$\begin{aligned} \sin(\gamma + \alpha - \varphi) &\geq 0 \\ \gamma + \alpha - \varphi &\leq 180^\circ \\ \gamma &\leq 180^\circ \end{aligned}$$

γ 如果超过 180° , 负载上得到的 VTH1 导通的正半周波

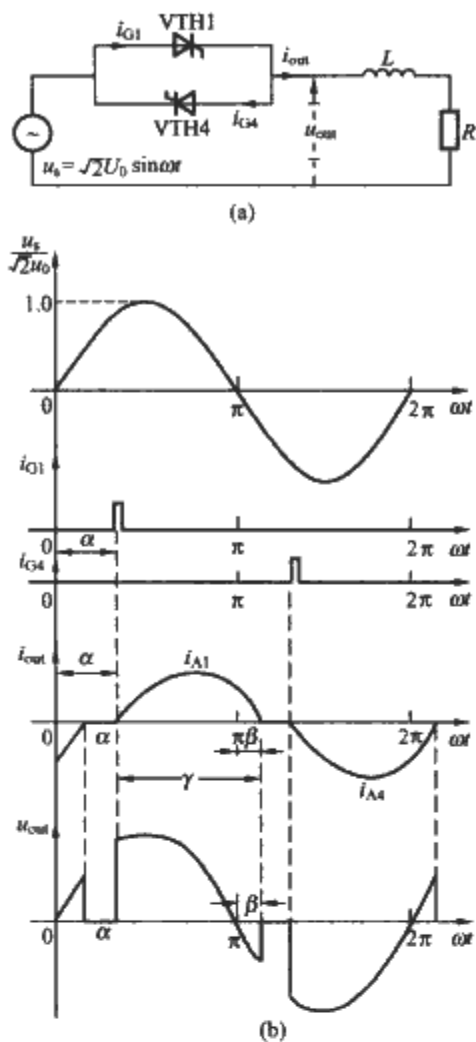


图 2.11-11 具有 RL 负载的单相交流调压电路及其电压、电流波形
(a) 单相交流调压电路；(b) 电压、电流波形

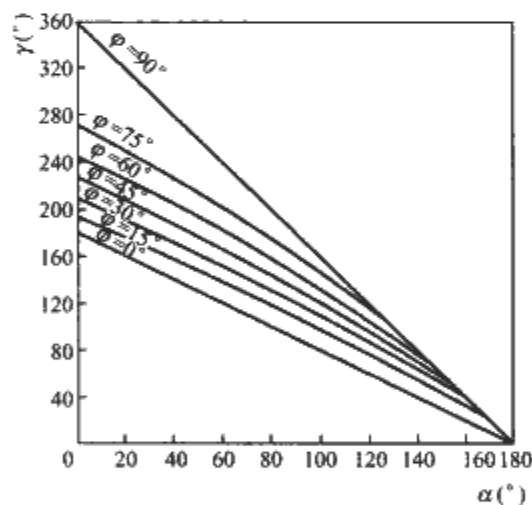


图 2.11-12 图 2.11-11(a)所示电路在 VTH1 导通时的 γ 与 α 的关系曲线

形就与 VTH2 导通的负半周波形相连续起来，负载的电压与电源电压相同，不再发生变化。这时图 2.11-13 所示的曲线簇就变成图 2.11-15 所示的曲线簇了，它实际上是将图 2.11-12 中 $\gamma > 180^\circ$ 的部分削平了。

对于 $\alpha > \varphi$ 时，负载电流是断续的，随着 α 的增大，负载上的电压将减小，这就是正常的调压工作情况。

(3) $\alpha > \varphi$ 。如果触发脉冲如图 2.11-11 中所示那样是窄脉冲，则电路将不能正常工作。因为在 $\omega t = \alpha$ 时触发导通 VTH1 晶闸管，它将在 $180^\circ + \alpha$ 时继续导通，VTH4 承受反向电压，这时加在 VTH4 晶闸管上的触发脉冲将不能使 VTH4 导通，等到 VTH1 关断时，VTH4 的触发脉冲已不复存在，VTH4 还是不能导通，直到 $360^\circ + \alpha$ 时，VTH1 又被触发导通。这样就出现了在窄触发脉冲作用下只有一个晶闸管反复导通，而另一个晶闸管始终关断的情况。单个晶闸管导通的波形含有很大的直流分量，如果负载是电阻很小的

电感负载（例如感应电动机），则会出现过电流（电动机还会出现制动转矩），电路不能正常工作。要解决这个问题，可以用宽触发脉冲（脉冲宽度 $\geq \varphi$ ）或脉冲列（脉冲列宽度 $\geq \varphi$ ）方式，这样在 $0 \leq \alpha \leq \varphi$ 的范围内改变触发控制角将不会改变输出电压。

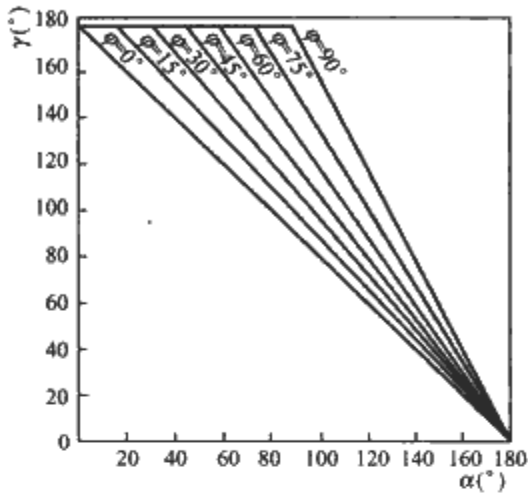


图 2.11-13 图 2.11-11(a)所示电路的 γ 与 α 的关系曲线

图 2.11-11(a)所示电路的 I_{QN}^* 与触发角 α 的关系如图 2.11-14 所示。

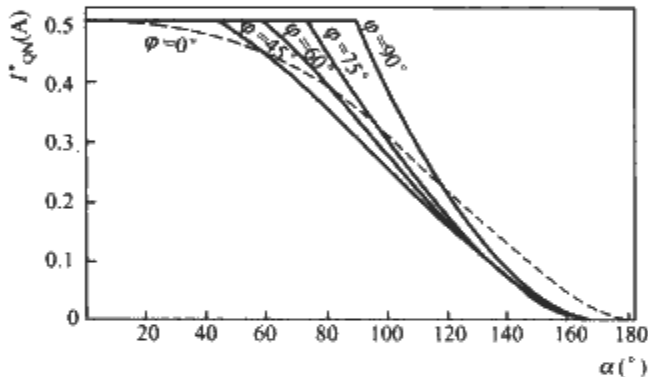


图 2.11-14 图 2.11-11(a)所示电路的 I_{QN}^* 与 α 的关系曲线

2.3 三相交流调压电路原理

如图 2.11-16 所示为一个三相全波负载为星形连接的三相交流调压电路，每相有两个反并联连接的晶闸管，图中负载按星形连接，也可以把负载接成三角形。该电路的输入电压及触发脉冲顺序如图 2.11-17 所示。

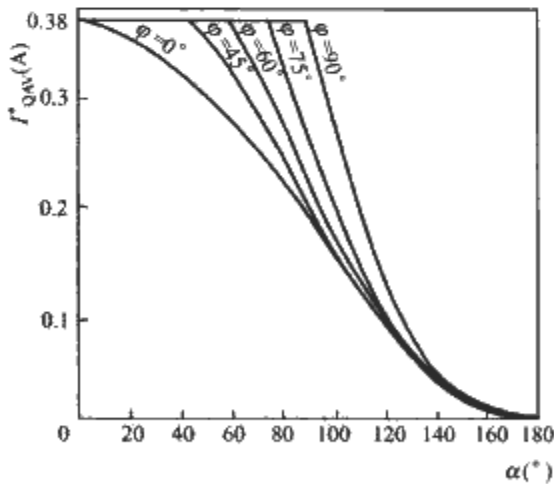


图 2.11-15 I_{QAV}^* 与触发角 α 的关系曲线
三相电压分别为

$$\begin{aligned} u_{AN} &= \sqrt{2}U_0 \sin \omega t \\ u_{BN} &= \sqrt{2}U_0 \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ u_{CN} &= \sqrt{2}U_0 \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{aligned}$$

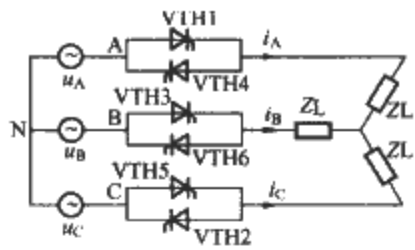


图 2.11-16 三相全波负载为星形连接的三相交流调压电路

它们如图 2.11-17 所示。对于 A 相的晶闸管 VTH1 来说，只有当 u_{AN} 为正时，触发它才能使它导通，所以，延迟触发角 α 将从 $\omega t=0$ 算起。

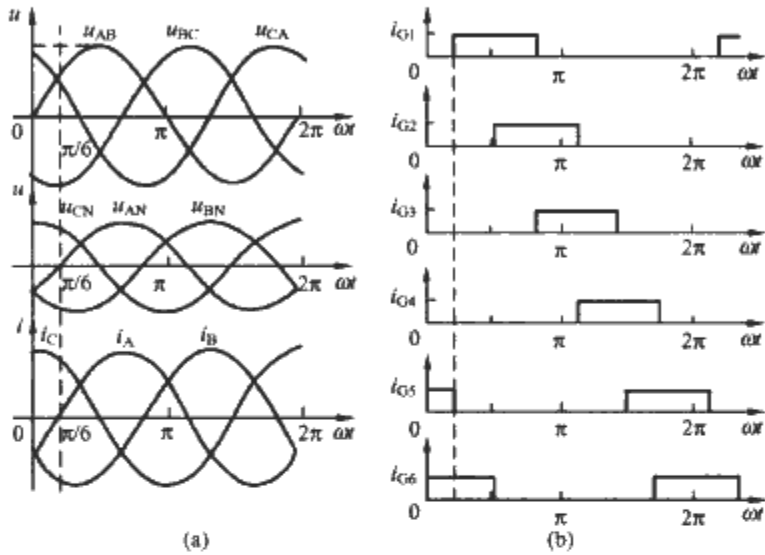


图 2.11-17 图 2.11-16 所示三相交流调压电路的输入电压及触发脉冲顺序
(a) 输入电压；(b) 触发脉冲顺序

同理，每一相的晶闸管延迟触发角 α 都是以该相电压过零点作为起始点，也即在 VTH1 管触发导通以后，延迟 $\pi/3=60^\circ$ 触发 VTH2 管，再延迟 $\pi/3=60^\circ$ 触发 VTH3 管等。即各晶闸管的触发顺序为 VTH1、VTH2、VTH3、VTH4、VTH5、VTH6，依次相隔 60° 电角。

其次，在此电路没有中线，若要负载电流流通，至少要有两相的晶闸管导通，以构成通路。如果在 $\omega t=\alpha$ 时只有 VTH1 管加触发脉冲，它是不可能导通的，必须 VTH6 管同时有触发脉冲，使 VTH1 和 VTH6 管同时导通，电路才能正常工作。同理，在给 VTH2 管施加触发脉冲时，必须让 VTH1 管仍然保有触发脉冲。所以，每个晶闸管的触发脉冲必须采用大于 60° 的宽脉冲，或是相隔 60° 的双脉冲才行。

从 2.2 节可见，负载的阻抗角 $\varphi=\arctan\omega L/R$ 对调压电路的工作有很大影响。 $\varphi=0^\circ$ 是最简单的情况，却可以弄清晶闸管调压的工作情况。然后再讨论 $\varphi>0^\circ$ 的情况就方便了。

2.3.1 三相调压电路在负载阻抗角 $\varphi=0^\circ$ 时的工作

(1) 控制角 $\alpha=0^\circ$ 时。这是电路在自然运行状态下的工作，也即相当于用整流二极管替换晶闸管后的运行状态，晶闸管全导通而负载上可得到全电压。根据上述触发脉冲安排的原则，图 2.11-18(a) 画出了相应的触发脉冲信号 u_g ，它是在相电压波形的起始点给出的。图 2.11-18(a) 中还给出了各晶闸管导通的区间以及负载上的电压、电流波形。

可以看出，正向晶闸管 VTH1、VTH3、VTH5 都在电源电压波形正半波的起始点被触发导通；而反向晶闸管

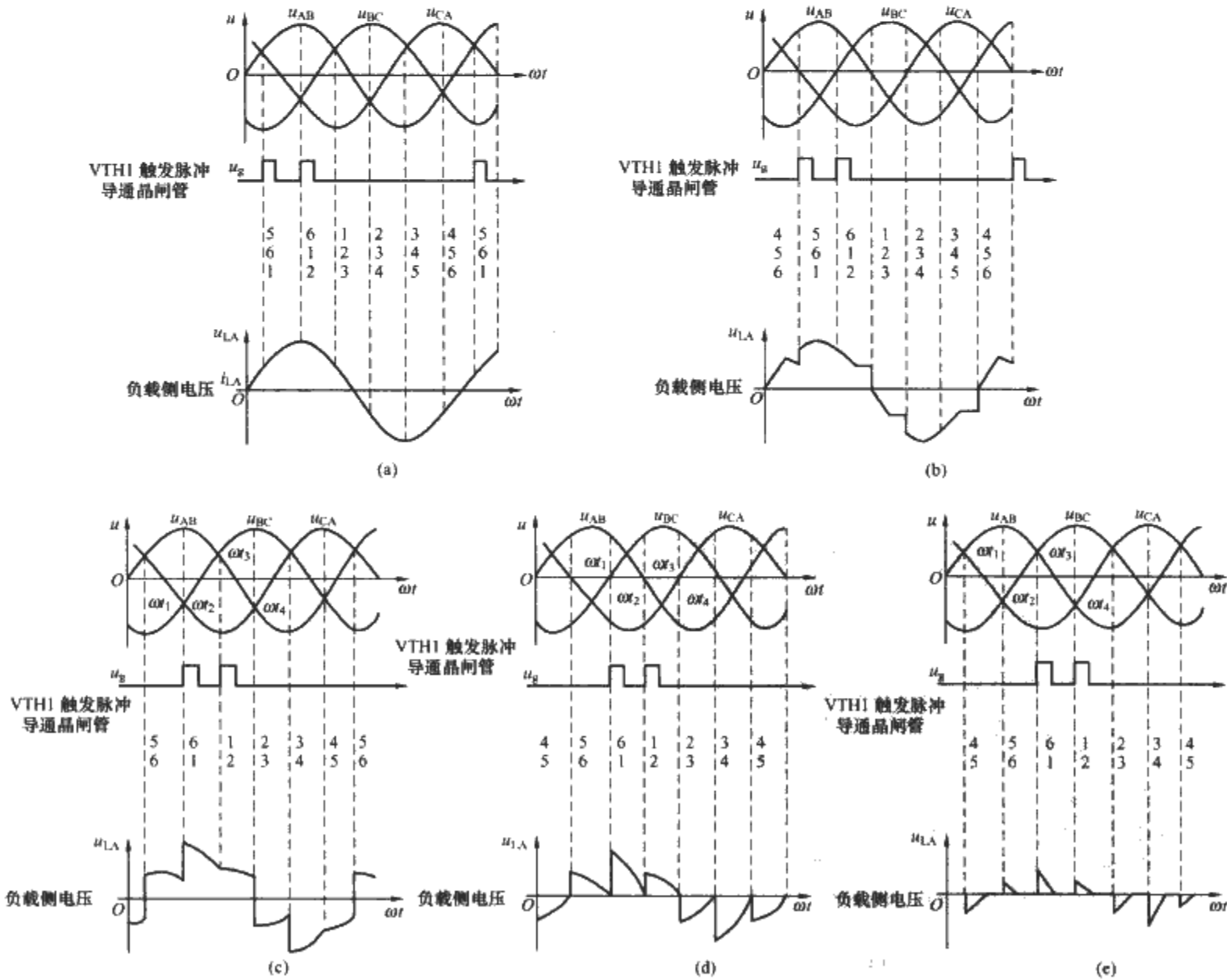


图 2.11-18 三相星形连接调压电路的波形 ($\varphi=0^\circ$ 时)
(a) $\alpha=0^\circ$ ；(b) $\alpha=30^\circ$ ；(c) $\alpha=60^\circ$ ；(d) $\alpha=90^\circ$ ；(e) $\alpha=120^\circ$

VTH4、VTH6、VTH2 则都在电源电压负半波的起始点被触发导通。每个元件都连续导通 180° ，即在该半波过零点时自行关断，而每一个 60° 区间都有 3 个晶闸管同时导通。如在 $\omega t = 0 \sim \pi/3$ 区间，A、C 相电压为正，B 相电压为负，此时 VTH1、VTH5、VTH6 同时导通；在 $\omega t = \pi/3 \sim 2\pi/3$ 区间，A 相电压为正，B、C 相电压为负，此时 VTH1、VTH2、VTH6 同时导通，以此类推。由于在所有区间内任何时刻都有 3 个晶闸管导通工作，使得三相电路中正反方向在任何时刻都能流通电流，所以可将所有可控元件看作为二极管。因而此时三相调压电路相当于一般的三相交流电路。由于负载对称，所以各相电流相等，负载上的电压波形也对称，因此可以只分析一相波形。以 A 相电路为例， $i_A = u_A/R$ 。在 A 相负载上的电压波形 $u_{LA} = f(t)$ 与电流波形 $i_A = f(t)$ 相似[见图 2.11-18(a)]，负载上所得到的电压是全电压。

(2) 控制角 $\alpha = 30^\circ$ 时。如图 2.11-18(b) 所示，在 $\omega t = \pi/6$ 时，触发 VTH1。因 VTH5 早已被触发，由于此时 u_C 仍为正半波，所以即使 VTH5 的触发脉冲已消失，但它仍能维持导通。对于 VTH6，则由于其触发脉冲大于 60° ， u_B 又在负半波，所以使 B 相电路中的反向晶闸管 VTH6 继续导通。此时电路中三相各有一个晶闸管导通，负载上的电压即为电源相电压 $U_{LA} = U_A$ 。但到 $\omega t = \pi/3$ 时，由于 u_C 过零点，VTH5 自行关断，所以在 $\omega t = \pi/3 \sim \pi/2$ 区间，只有 VTH1、VTH6 导通。在图 2.11-16 所示的电路中，就像 C 相开路，所以 A 相负载上的电压 U_{LA} 为 u_{AB} 的一半。在 $\omega t = \pi/2 \sim 2\pi/3$ 区间，VTH2 被触发导通，此时有 VTH1、VTH2、VTH6 3 个元件导通，所以在每一相负载上的电压即为电源相电压。在 $\omega t = 2\pi/3 \sim 5\pi/6$ 区间，VTH6 又因 u_B 过零关断，只有 VTH1、VTH2 导通，所以，在 A 相负载上的电压为 $u_{AC}/2$ 。在 $\omega t = 5\pi/6 \sim \pi$ 区间，元件 VTH1、VTH2、VTH3 导通，A 相负载电压 u_C 过零。在 $\omega t = \pi \sim 7\pi/6$ 区间，VTH1 过零变负而关断，只有元件 VTH2、VTH3 导通，此时相当于 A 相开路，所以 A 相负载上无电压、电流。根据以上分析可得，在 $\alpha = 30^\circ$ 时 A 相负载上电压波形 u_{LA} 如图 2.11-18(b) 所示。

在只有两相导通时的电流为

$$i_{AB} = i_A = -i_B = \frac{u_{AB}}{2R}$$

(3) 控制角 $\alpha = 60^\circ$ 时。如图 2.11-18(c) 所示，在 $0 \sim \omega t_1$ 区间，VTH1 未被触发导通，所以 A 相电流等于零。

在 $\omega t_1 \sim \omega t_2$ 区间，在 $\omega t = \omega t_1$ 时刻因 u_C 过零 VTH5 被关断，而 VTH1 被触发导通。所以，元件 VTH1、VTH6 导通，A 相负载上所得到的电压是 u_{AB} 的一半，即 $U_{LA} = u_{AB}/2$ 。

在 $\omega t_2 \sim \omega t_3$ 区间元件 VTH6 关断，VTH1、VTH2 导通，A 相负载上所得电压为线电压 u_{AC} 的一半。

后半周期工作情况与前半个周期相似，所以可得到与前半个周期相对称的负载电压波形。

(4) 控制角 $\alpha = 90^\circ$ 时。如图 2.11-18(d) 所示，在 $\omega t_1 \sim \omega t_2$ 区间，只有 VTH1、VTH6 导通。所以 A 相负载上所得电压 $U_{LA} = u_{AB}/2$ 。在这区间内，虽然 B 相电压波形出现过零点，但此时 $u_A > u_B$ ，VTH6 的阳极电压相对于阴极电压为正，所以它并不会关断，而维持导通。直至 $\omega t = \omega t_2$ 时刻， $u_{AB} = 0$ ，即 $u_A = u_B$ 。此时 AB 相回路中无电流流通，而把 VTH6 关断，但 VTH1 并不会关断，因为过了 ωt_2 时刻，VTH1 的阳极又得到相对于阴极为正的电压，而其触发脉冲还维持存在，同时 VTH2 又被触发导通，所以 A 相

电流可经 C 相电路而继续导通。

同理分析 $\omega t_2 \sim \omega t_3$ 区间，由于 $u_{AC} > 0$ ，可得 $U_{LA} = u_{AC}/2$ 的波形。

在 ωt_3 时，由于 $u_{AC} = 0$ ，所以 VTH1 关断， $u_{LA} = 0$ 。

负半波时的情况与正半波情况相似，由此可得到与正半波相对称的负载电压波形。

(5) 控制角 $\alpha = 120^\circ$ 时。如图 2.11-18(e) 所示，设在 $\omega t = \omega t_1$ ，时刻给 VTH1 以触发脉冲，并考虑到 VTH6 的触发脉冲还未消失，而在 $\omega t_1 \sim \omega t_2$ 段内 $u_A > u_B$ ，所以 VTH1 与 VTH6 都被触发导通，在负载上得到 $u_{AB}/2$ 的电压。到 $\omega t = \omega t_2$ 时刻， $u_A = u_B$ ，即是 u_{AB} 开始过零反向，故 VTH1、VTH6 受反压而被关断， $u_{LA} = 0$ 。

$\omega t_2 \sim \omega t_3$ 一段时间内整个调压电路中所有晶闸管元件都处于关断状态，所以维持 $u_{LA} = 0$ 。

$\omega t = \omega t_3$ 时刻，VTH2 得到触发脉冲，并且 VTH1 的触发脉冲继续存在，所以在 $u_A > u_C$ 的情况下使 VTH1、VTH2 都导通。在负载上得到的电压为 $U_{LA} = u_{AC}/2$ ，并一直维持到 ωt_4 时刻，此时 u_{AC} 开始过零反向而把 VTH1、VTH2 关断。

$\omega t_4 \sim \omega t_5$ 段内， u_{LA} 维持为零。

$\omega t_5 \sim \omega t_6$ 段内，虽有 VTH2、VTH3 导通，但是 A 相无元件导通，所以， u_{LA} 维持为零。负半波的情况分析同上。

(6) 控制角 $\alpha > 150^\circ$ 时。从电源电压波形图可知，当在 $\alpha > 150^\circ$ 时给 VTH1 以触发脉冲是没有作用的。因为此时虽然 VTH6 的脉冲也还存在，但由于 $u_A < u_B$ ，所以 VTH1 与 VTH6 都处于反压状态而无法导通。因此这种交流调压电路控制角的最大移相范围应为 150° 。

根据如图 2.11-18 所示的 5 种情况分析可以看出，在 3 组反并联晶闸管接成的三相交流调压电路中，每一相负载上所得到的电压与电流波形在不同 α 角时是不相同的。随着控制角 α 的增大，负载上电流不连续的程度增加，负载所得到的电压也相应随之降低。由于调压控制在实质上是改变一个周期内电压波形导通角的大小，所以输出的不是正弦波。但每一相负载上所得到的电压波形正负半波对称。根据谐波分析可知，对于这种三相对称控制电路，其输出电压中只有奇次谐波，并以 3 次谐波所占比重最大。由于本电路没有零线，所以虽有 3 次谐波电动势，而 3 次谐波却无通路，故没有 3 次谐波电流，这样对电源装置的干扰也可小些。

2.3.2 在三相电阻—电感负载 ($\varphi \neq 0^\circ$) 时的工作

当三相调压电路中有电感负载 (即 $\varphi \neq 0^\circ$) 时，分析工作就很复杂。因为在线电压或相电压过零瞬间，晶闸管的导电并不停止，负载中仍有电流在流通；同时要考虑三相电路工作的特点以及负载阻抗角的大小，它直接影响到每相电路导电的时间。如图 2.11-19 所示为图 2.11-16 所示电路的线电流示波图。

如图 2.11-20 所示为图 2.11-16 所示电路在 RL 负载时的工作波形 ($\alpha = \varphi = 40^\circ$)。

它分别给出了三相负载相电压与相电流的波形。可以看到 i_A 落后于 u_A 40° ，但 i_A 与 u_A 波形基本上都连续，说明任何瞬间都有 3 个晶闸管导通，而负载上所得到的电压是不可调的最大值。图中在 α 时刻以后，每隔 60° 都出现电压波形有缺口与电流波形振荡的现象，这正好是晶闸管关断的时刻。这是由于晶闸管不是理想的元件，它并不是在零电流时关断而是在一个很小的反电流下才关断。所以在关断瞬间，储存在负载电路电感中的能量将消耗在由电感和用来限制晶闸管电压变化率的 RC 吸收电路中 (即与晶闸管并联的 RC 保护

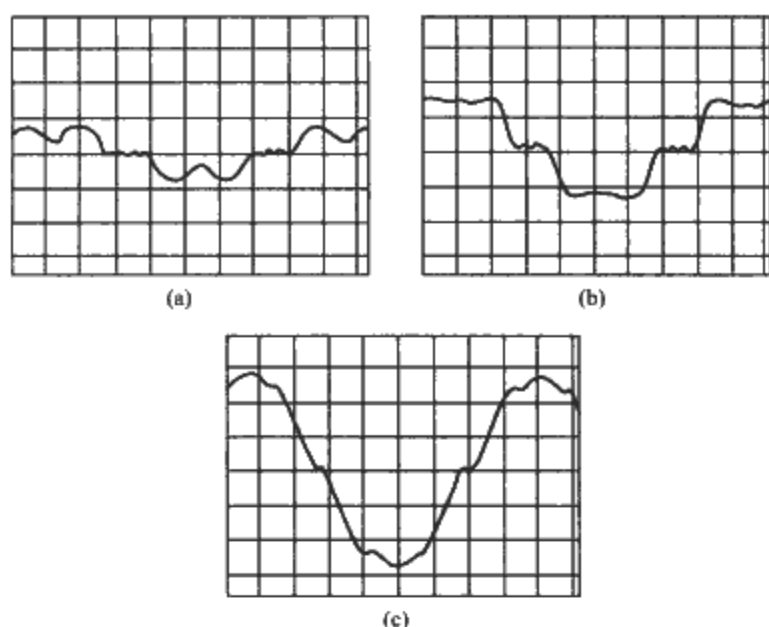


图 2.11-19 图 2.11-16 所示电路的
线电流示波图 ($\varphi=\pi/4$)
(a) $\alpha=60^\circ+\varphi$; (b) $\alpha=45^\circ+\varphi$; (c) $\alpha=\varphi$

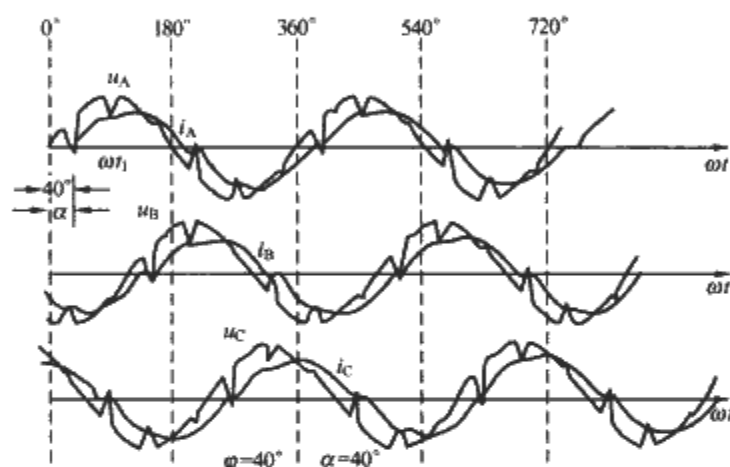


图 2.11-20 图 2.11-16 所示电路在 RL 负载时的工作波形 ($\alpha=\varphi=40^\circ$)
 u —负载电压; i —电流

电路),从而引起电流的振荡与电压波形的缺口。当然缺口的大小与电路元件的参数是关联的。例如在图 2.11-33 的 ωt_1 时刻之前,由于三相晶闸管 V_{TH1} 、 V_{TH6} 、 V_{TH5} 都导通,电流从 A、C 相流向 B 相,此时三相电路在正常工作状态。到 $\omega t=\omega t_1$ 时刻, C 相电流过零, V_{TH5} 被关断,而 V_{TH2} 还未导通。此时只有 A、B 相形成电流回路,为维持原来的电流变化趋势,有如下的电路方程式

$$\begin{aligned} u_{AB} &= i_A(R_A + R_B) + e_{LA} + e_{LB} \\ &= i_A(R_A + R_B) - L_A \frac{di_A}{dt} + L_B \frac{di_A}{dt} \end{aligned}$$

当不计 L 作用时,在 ωt_1 时刻星形连接电路中一相负载上的电压为 $u_{AB}/2$,显然它小于相电压。当计及 L 作用后,星形连接中点的电位也变了,对 A 相负载来说压降为 $i_A R_A - L_A di_A/dt$,而 B 相则为 $i_A R_B + L_B di_A/dt$,所以此时压降减小了,负值的绝对值也更大了。同样可分析其他晶闸管切换点上的波形。

至于在 $\alpha \neq \varphi$ 时的波形分析则更为麻烦,因为此时很难计算出每一相电路的导通时刻(它与 α 、 φ 都有关)。

通过试验,可获得如图 2.11-16 所示的晶闸管电流平均值 $I_{QAV} = f(\alpha)$ (见图 2.11-21)和晶闸管电流有效值 $I_{QN} = f(\alpha)$ (见图 2.11-22)的曲线。图中给出的电流都是标么值,其所对应的基准电流 I_b 为 $\sqrt{2}U_0/\sqrt{3}Z$ (U_0 为线电压有效值)。这些曲线对于计算三相星形连接电阻—电感负载的调

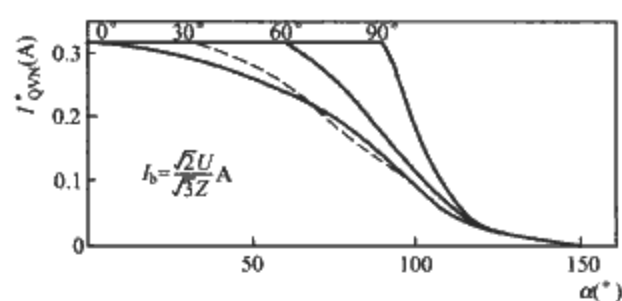


图 2.11-21 图 2.11-16 所示的晶闸管电流平均值
 $I_{QAV} = f(\alpha)$

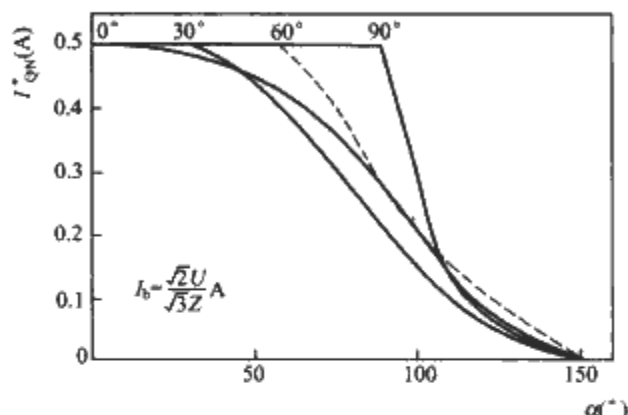


图 2.11-22 图 2.11-16 所示的晶闸管电流有效值 $I_{QN} = f(\alpha)$

压电路是很有用的。

2.4 晶闸管三相交流调压电路的接线方案

对于图 2.11-16 所示三相全波交流调压电路来说,负载也可以接成三角形,其工作原理与星形负载相同,因为三角形负载可以等效为三角形负载。除此以外还有许多接线方案。

2.4.1 带零线的三相交流调压电路

如图 2.11-23 所示为带零线的三相交流调压电路,它是在图 2.11-16 所示三相全波交流调压电路的基础上,将负载的中点与电源的中点相连接(零线),从而使各相通过零线自成回路,它们相当于 3 个单相晶闸管交流调压电路的组合。因此其工作原理以及每相负载上的波形与单相交流调压电路相同,电路中各晶闸管承受的电压、电流可以按照接于相电压的单相调压器所需的数值来计算。该电路的缺陷是零线中有很大的 3 次谐波电流,由于 3 次谐波属于零序分量,它在零线中的电流值为各相 3 次谐波值的代数和。在 $\alpha=90^\circ$ 时 3 次谐波分量为最大,其零线电流接近额定相电流,所以零线的导线截面积要求与相线相同。由于零线电流很大,因此很少采用这种调压电路。

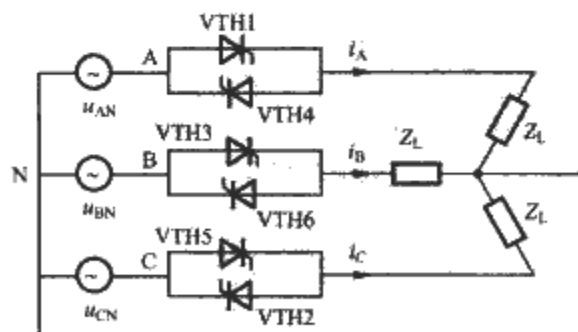


图 2.11-23 带零线的三相交流调压电路

2.4.2 三相半波交流调压电路

为了节省元件的费用,也可以采用如图 2.11-24 所示的三相半波交流调压电路,它的每相用 1 个晶闸管和 1 个二极管反并联连接,其控制范围为 $\alpha=0\sim 210^\circ$ 。这种调压电路的

缺点是每相的输出电压和电流波形的正负半波不对称,因此兼有奇次和偶次谐波,而偶次谐波在电动机里会产生与基波转矩作用相反的制动转矩,使电动机输出转矩减少。因此,这种电路没有在软起动器中应用。

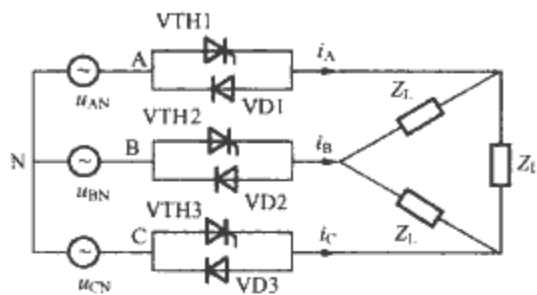


图 2.11-24 三相半波交流调压电路

2.4.3 二线控制三相交流调压电路

在图 2.11-16 所示的三相全波交流调压电路中,如果把其中一路的反并联连接的晶闸管短接,如图 2.11-25 所示,无论负载是星形或三角形接法,电路仍然能够正常工作(可以调节负载电压)。由于省去了一对反并联晶闸管,降低了成本。但该电路输出三相电压波形极不平衡,会对电网造成不平衡,而且该电路即使在 $\alpha=180^\circ$ 时,直通相与滞后控制相也有一定的输出电压。所以,该电路只能用于小功率的三相调压电路中,并且要求负载允许调压输出的最小值大于零。在简易型的小功率中也有采用这种电路的,例如 ABB 公司的 PSS 系列软起动器。

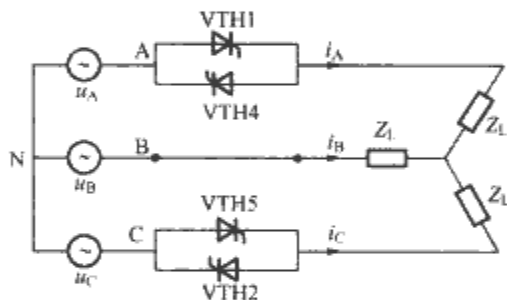


图 2.11-25 负载为星形连接的二线控制三相交流调压电路

2.4.4 内三角形连接的三相交流调压电路

如图 2.11-26 所示,每相的反并联晶闸管串联构成三角形,三角形的 3 个顶点接在三相线电压上。它实际上相当于 3 个单相调压电路的组合,其移相控制范围为 $0\sim180^\circ$ 。这样接法的好处是晶闸管承受的电流是图 2.11-16 所示电路的 $1/\sqrt{3}$,对于软起动器来说,可以用来驱动大 3 倍的电动机功率。但这种接法的前提是负载的 6 个端点必须能单独引出。

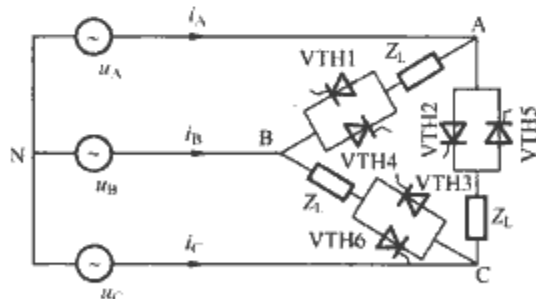


图 2.11-26 内三角形连接的三相交流调压电路

2.5 中点控制的三相调压电路

如图 2.11-27 所示,3 个晶闸管星形连接,接在三相负载电路的中点上。这种调压电路最简单,只用 3 个晶闸管,但是在同样负载电流下晶闸管中流过的电流是上述各种电路中最大的,其移相控制范围为 $0\sim210^\circ$ 。其输出电压正负半周不对称,所以负载上有偶次谐波电流流过,它将使磁路饱

和。对电动机来说,还会产生与基波转矩作用相反的制动转矩,使电动机输出转矩减少。因此,软起动器不使用这种调压电路。

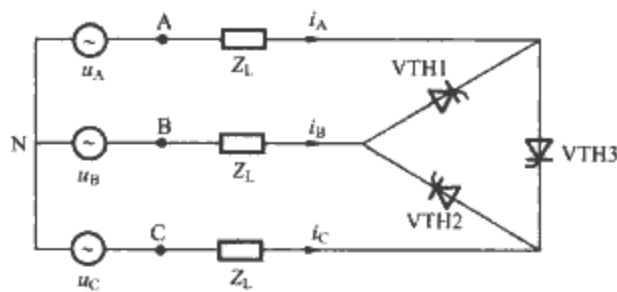


图 2.11-27 中点控制的三相调压电路

综上所述,只有图 2.11-16 和图 2.11-26 所示的三相交流调压电路在输出电压为 $0\sim100\%$ 范围内能保持三相平衡,波形上下对称,没有偶次谐波和零线电流。所以,现代的软起动器大多采用这两种调压电路。

3 软起动器的运行和保护功能

性能完善的固态电动机软起动器不仅能对电动机实行软起动,而且还可以对电动机的运行(例如旁路运行或者自动节能运行)以及停止(例如自由停车、软停车、泵停车、快速停车)实行控制。本节将分别讨论固态电动机软起动器对电动机的起动、运行和停止的控制。

3.1 软起动器对电动机的起动控制

固态电动机软起动器对电动机的起动控制通常有电压斜坡控制、电流斜坡控制和转矩控制 3 种方式。

3.1.1 电压斜坡控制方式

如图 2.11-28 所示为固态电动机软起动器的典型电压斜坡控制起动曲线。

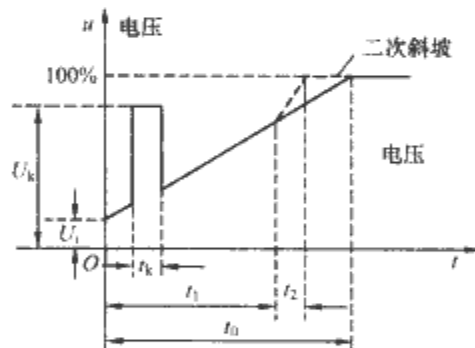


图 2.11-28 固态电动机软起动器的典型电压斜坡控制起动曲线

(1) 起动初始电压 U_i 。这个电压是在起动器接受到起动指令后最早输出的电压。如果起动初始电压 U_i 过小的话,则电动机的起动转矩很小,不足以克服阻力矩,电动机就不能起动。所以,初始电压应根据负载阻力矩来选择,通常初始起动电压可在 $30\%\sim95\%$ 额定电压调节。这时的起动转矩为 $0.3^2\sim0.95^2$ 倍的直接起动转矩,也即约为 $9\%\sim90.25\%$ 的直接起动转矩。

(2) 斜坡时间 t_0 。通常的固态软起动器采用一次电压斜坡控制,即软起动器的输出电压按照一定的斜率线性增加直到额定电压为止,这段时间就是斜坡时间 t_0 。这个时间可以根据需要来设置。

(3) 脉冲突跳起动电压 U_k 。有些负载例如皮带输送机、挤压机和搅拌机静阻力矩比较大,必须要施加一个短时的大起动转矩,以克服大的静摩擦力。所以,在软起动器上设置了脉冲突跳起动方式,它可以短时输出一个大的电压例如 $70\%\sim95\%$ 的额定电压,称之为脉冲突跳起动电压。

(4) 脉冲突跳起动时间 t_k 。它是脉冲突跳起动电压 U_k 的持续时间, 通常在 0.1~10s 可调。

(5) 二次斜坡电压。有些情况下, 或受到允许起动电流大小的限制, 或受到负载加速的限制, 为了与负载阻力矩匹配较密切, 一次斜坡电压设置得比较平坦, 往往会出现这样一种情况, 在达到某个转速以后, 若电压仍以原设定的斜率上升, 则电动机的转矩将不足以继续克服负载力矩使电动机起动到额定转速。在该情况下就需要提高软起动器输出电压的斜率 (如图 2.11-28 中的虚线所示), 称之为二次斜坡电压。

(6) 二次斜坡时间 t_2 。二次斜坡电压的持续时间称为二次斜坡时间 t_2 。

3.1.2 电流斜坡控制方式

电压斜坡控制方式是随时间线性地输出电压给电动机, 但异步电动机的转子电流与电动机的阻抗参数有关

$$I' = \frac{U_1}{\sqrt{r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_{20}')^2}}$$

电动机的阻抗与电动机的转差率 s 有关, 也即与电动机的转速有关。因此, 线性电压变化并不能得到线性电流变化。当负载转矩变化时, 同样的电压斜坡产生的电流就不一样, 从而导致电动机加速过程不一样。另外, 如果由于意外, 电动机发生瞬时堵转, 还会产生过大的冲击电流, 这些都是电压斜坡的缺点。为了克服该缺点, 比较好的固态软起动器采用电流斜坡控制方式。与电压控制方式相似, 也有初始电流、最大电流、斜坡时间、脉冲突跳起动电流、脉冲突跳起动时间等参数的设定。

下面以一台 3250HP 电动机驱动制氧机为例说明固态电动机软起动器起动电动机的工况。固态软起动器所接供电系统如图 2.11-29 所示。

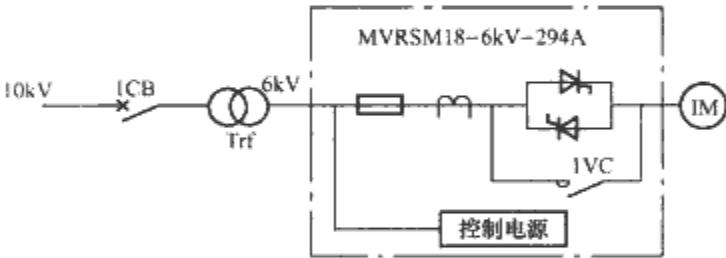


图 2.11-29 固态软起动器所接供电系统

图 2.11-29 中 Trf 为供电变压器, 其容量为 4000kVA。电动机参数如下:

额定功率 P_N : 2421kW。

电机服务系数: 1.15。

额定电压 U_N : 6kV。

额定电流 I_N : 265A。

额定转速 n_N : 2975r/min。

额定转矩 T_N : $T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 7771.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

电机效率 η : 0.966。

电机功率因数 $\cos\varphi$: 0.91。

该电动机在全电压下的转矩特性和电流特性如图 2.11-30 所示。

在空载即阀门全关时的负载机械特性如图 2.11-31 所示。当以初始电流为 200% 额定电流、最大电流为 280% 额定电流、斜坡时间为 25s 的电流斜坡去起动该负载时, 其速度、转矩等特性曲线均如图 2.11-31 所示。

图中: 曲线 (1) —速度; 曲线 (2) —一起动电流斜坡; 曲线 (3) —电动机电磁转矩; 曲线 (4) —净加速转矩; 曲线 (5) —负载转矩 (阀门全关时)。其中, 转矩均以电动机

的额定转矩为基准值。

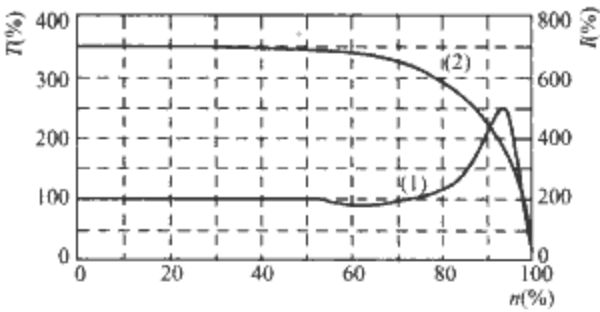


图 2.11-30 电动机在全电压下的转矩特性 (曲线 1) 和电流特性 (曲线 2)

在阀门全开 (满载) 情况下, 负载转矩增加, 其随速度的变化曲线如图 2.11-32 所示。这时的起动电流斜坡如下: 初始电流为 200% 额定电流 (530A); 最大电流为 450% 额定电流 (1193A); 斜坡时间为 20s, 这时各参数随速度变化的曲线如图 2.11-32 所示。

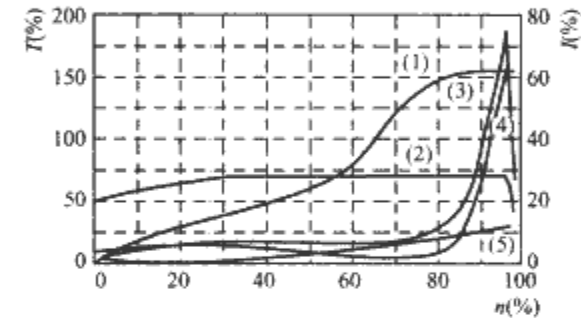


图 2.11-31 以电流斜坡去起动带压缩机负载 (空载) 的 2400kW 电动机的各参数变化曲线

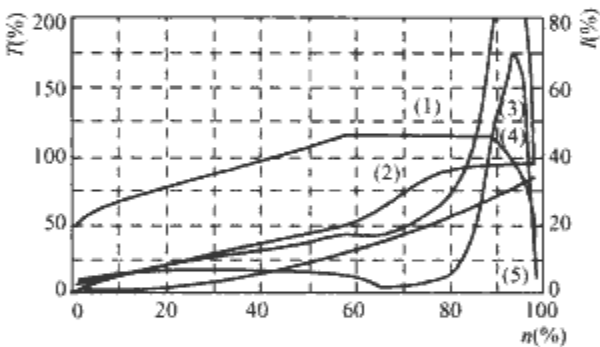


图 2.11-32 以电流斜坡去起动带压缩机负载 (满载) 的 2400kW 电动机各参数变化

图中: 曲线 (1) —速度; 曲线 (2) —一起动电流斜坡; 曲线 (3) —电动机电磁转矩; 曲线 (4) —净加速转矩; 曲线 (5) —负载转矩。其中, 转矩均以电动机的额定转矩为基准值。

3.1.3 转矩控制方式

大多数先进的固态软起动器使用的闭环控制是电动机线电流有效值的闭环控制。多数情况下, 一个线性电流斜坡用作电流给定值, 当电动机起动时, 控制被测电流使之跟随输入给定值斜坡。这种控制方法在许多应用中都工作得很好。然而在许多泵、皮带运输机以及其他需要精确控制转矩的场合, 在起动过程中需要直接控制电动机的转矩。

异步电动机的转子电流为

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_{20}')^2}}$$

电动机的转矩为

$$T = \frac{3}{\Omega_0} I_2'^2 r_2' / s$$

$$= 28.69 \times \frac{U_1^2}{n_0 [(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_{20}')^2]} \times \frac{r_2'}{s}$$

电动机转矩与转差率 s , 也即与转速 n 呈非线性关系。

所以，无论是采用电压斜坡或是电流斜坡控制都无法避免在转速接近额定转速时发生的转矩的冲击。

多年来，开发了许多方法试图降低转矩浪涌。由于系统给定的约束条件，开发一种平滑而精确的转矩控制是困难的。这些约束条件包括这样一个事实，即软起动器需要在连接到大范围电动机、具有广泛变化的负载和各种参数的电源下发挥作用。正因为如此，要预测电动机达到其额定速度的时间并不容易。再者需要在没有任何速度反馈和电动机电压反馈的情况下做到平滑运行，并且晶闸管又具有一旦导通就必须到换流时才会关断的特性，这就排除许多简单的方法或技术。

有许多解决方法被开发出来，其中包括各种“伪矢量”控制和功率因数控制方案。然而，试验证明大多数这些方法比现有的电流控制方法改进甚少。转矩控制方法比现有的电流控制在平滑转矩上有了显著的改善，其基本原理如下：三相电动机的输入功率 $P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1$ ，其电磁功率 P_{EM} 用来作功， $P_{EM} = \eta P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1 \eta$ ，所以电磁转矩 $T = \frac{P_{EM}}{\Omega_0} = \frac{3}{\Omega_0} U_1 I_1 \cos\varphi_1 \eta$ 。 $\Omega_0 = \frac{2\pi}{60} n$ 为旋转磁场的角速度， η 为电动机的效率。根据上述公式来做的软起动器并不测量加于电动机定子的端电压，而是根据晶闸管的触发角 α 来计算的。另外 TruTorque 使用了一种算法，根据各种测量值来计算电动机的效率，其计算精度对于转矩的近似计算来说是允许的。

根据上述原理作出的转矩控制闭环如图 2.11-33 所示。

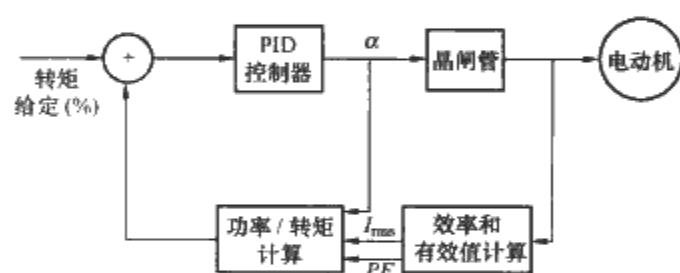


图 2.11-33 TruTorque 转矩控制闭环

3.2 软起动器的运行控制

3.2.1 旁路运行方式

固态电动机软起动器在将电动机起动到额定速度后，软起动器中的晶闸管处于全开放状态。由于每个晶闸管的管压降约有 1V，故损耗较大。为了降低运行损耗，往往使用 1 个旁路接触器将晶闸管旁路，如图 2.11-34 所示。

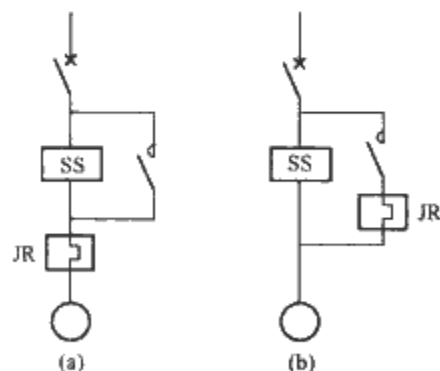


图 2.11-34 旁路运行方式
(a) 无电子保护装置；(b) 有电子保护装置

图 2.11-34(a)所示为现在常见的固态电动机软起动器在使用旁路接触器时的接线，在软起动器被旁路以后，为了保护电动机，在电路中使用了三相热继电器 JR。方案中的固态软起动器没有保护电动机的电子保护装置，过载保护靠热继电器，过电流保护靠断路器(或者熔断器)。由于要避开电

动机的起动电流，所以这里的热继电器并不能很好地保护电动机。

图 2.11-34(b)所示的固态软起动器具有一定保护功能的电子保护装置，这样热继电器就只在电动机起动完毕以后负责对电动机进行保护，因此对电动机的过载能有效地保护。

而上海电科公司生产的固态电动机软起动器具有完善的电动机保护功能，在电动机起动至额定速度进入旁路运行时，固态软起动器仍然对电动机进行全面保护(过载、过电流、接地、过电压、欠电压、缺相等保护)和管理(例如起停次数、运行时间、事故记录、诊断等)。

3.2.2 节能运行方式

有许多机械设备负载变化较大，有时满载运行，有时轻载甚至空载运行。例如地铁车站中的电动扶梯是最为典型的，当地铁列车到站时，电动扶梯上挤满了人，处于满载状态，而当列车离站以后，电动扶梯上空无一人，处于空载状况。不少皮带运输机也有类似情况。有些机床也是这样，在进刀时负载很重，而退刀时则为空载。对于这类负载有什么办法能节约运行时的电能呢？在 20 世纪 70 年代中期，美国宇航局工程师富兰克·诺瓦(Frank Nola)提出一项专利，从理论上解决了这个问题。接着在 20 世纪 80 年代初有许多专利根据诺瓦的理论提出各种方案解决三相电动机节能运行。

异步电动机在运行中会产生损耗，这些损耗主要是：

- (1) 定子电流在定子绕组中产生的电阻发热损耗 $I_1^2 r_1$ 。
- (2) 转子电流在转子绕组中产生的电阻发热损耗 $I_2^2 r_2$ 。

显然定子绕组损耗和转子绕组损耗都与负载电流的平方成正比，如果减少电动机电流就能减少这两部分损耗。

(3) 铁耗是磁场在铁心中产生的损耗 P_{Fe} ，它包括定子铁耗和转子铁耗。定子铁耗主要是基波磁通在定子铁心中引起的损耗(通常称为基本铁耗)；转子铁耗在电动机正常运行时由于转差率很小而可以忽略不计。铁耗主要与电动机磁场大小有关，同一电动机定子电压越高，磁场就越大，铁耗也就越大。铁耗约占电动机总损耗的 25%~40%。

(4) 风摩损耗 P_{win} 包括轴承摩擦损耗和通风损耗等。其大小主要与转速快慢有关，同一电动机转速越高，风摩损耗就越大。

(5) 杂散损耗 P_{mis} ，凡不能包括在上述各项中的损耗均归入杂散损耗，它主要有定子和转子的高频铁耗以及由转子导条与铁心之间绝缘不良而出现的横向电流损耗。

由于这些损耗与电动机的运行情况有关，造成电动机在不同运行情况下有不同的效率。如图 2.11-35 所示为异步电动机在额定电压和额定频率下运行时以标么值标出的转子转速 n 、电磁转矩 T_{em} 、功率因数 $\cos\varphi$ 、效率 η 和定子电流 I_1 等随输出功率 P_2 而变化的关系。

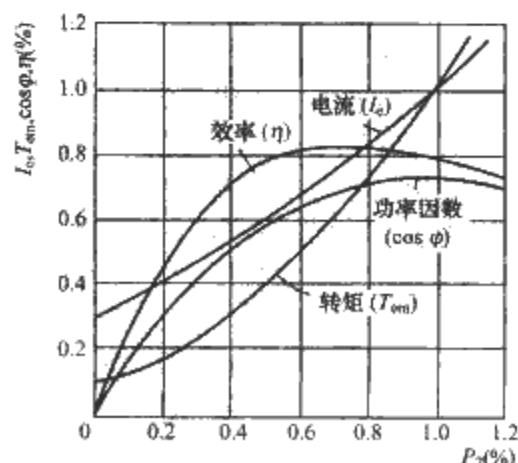


图 2.11-35 异步电动机的运行特性曲线

由图 2.11-35 可见,当电动机负载较轻时,其功率因数 $\cos\varphi$ 和效率 η 都急剧减少。如果在轻载时仍保持电动机有相应的转矩,同时又能减少电动机的损耗,则可以提高电动机的效率,达到节能的目的。

如图 2.11-36 所示为电动机在重载和轻载运行时的电压、电流的矢量关系,电动机输出电磁功率决定了 \dot{I}_2 的大小。电动机定子电流 \dot{I}_1 是由磁场电流 \dot{I}_0 与转子电流 \dot{I}_2 合成的结果。当输出电磁功率减少时,转子电流减少到 \dot{I}_2' ,这时由于定子电压保持不变,磁场电流仍为 \dot{I}_0 ,此时的合成定子电流为 \dot{I}_1' ,显然电动机的功率因数(即 \dot{I}_2' 与 \dot{U}_1 间夹角的余弦值)

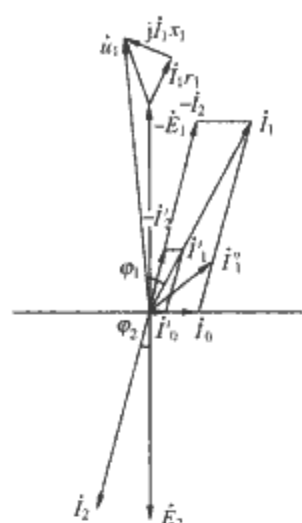


图 2.11-36 异步电动机在重载和轻载运行时的电流、电压矢量关系

$\cos\varphi$ 变低了。如果适当减少电动机定子电压,使磁场电流由 \dot{I}_0 变为 \dot{I}_0' ,则在保持输出电磁功率不变的情况下,合成的定子电流为 \dot{I}_1' ,这时的 $\dot{I}_1' < \dot{I}_1$ 。在这种情况下,不仅定子铜耗大大减少了,而且铁耗也大大减少了。

虽然电压减少了,但从电动机的机械特性看,只要电动机仍然运行在机械特性的转差率为至最大转矩对应的转差率 s_{max} 间,电动机的转速变化极小,电动机就仍然运行稳定。所以,电动机在轻负载或空载情况下,降低电动机的端电压使电动机工作在最高功率因数,从而降低电动机的损耗,又不影响负载的工况,这就是电动机节能运行原理。

3.3 软起动器的停机控制

使用固态电动机软起动器对电动机停机有 3 种方式:自由停机、软停机(包括适用于水泵停机的“泵停机”)以及直流制动停机。

3.3.1 自由停机

这是最简单的工作方式,在接收到停机信号后,固态电动机软起动器断开旁路接触器并关闭晶闸管停止输出电压给电动机,电动机和负载就在阻力矩作用下自由停机,这是一种完全不受控的停机方式。

3.3.2 软停机

软停机就是让电动机缓慢停下来,显然只有在停机时需要比自由停机花费更多时间的情况下才采用它。例如啤酒灌装流水线、水泵等负载就需要缓慢停车。

如图 2.11-37 所示为异步电动机调压时的机械特性,对恒转矩负载 T_L ,如果把电动机端电压 U_1 从 U_{1rat} ,下调至 U_{12} ,电动机的转速从 n_1 下降到 n_2 , n_2 与 n_1 很接近,电动机仍然能稳定工作,并不会停机。只有当电压下降到 U_{13} 时,此时机械特性的最大转矩 $T_{BR} = T_{BR3}$ 略小于负载转矩 T_L ,转速一旦低于 n_{BR} ,电动机便不再能稳定运行,在负载转矩的作用下停机。

所以,对于采用电压控制的固态软起动器,必须设置初始停机电压小于图 2.11-39 的 U_{13} 才能停机。另外从图 2.11-37 还可以看到,即使此后保持 U_{13} 不变,在负载转矩与电动机电磁转矩特性曲线间的差值就是制动力矩,它是随着转速

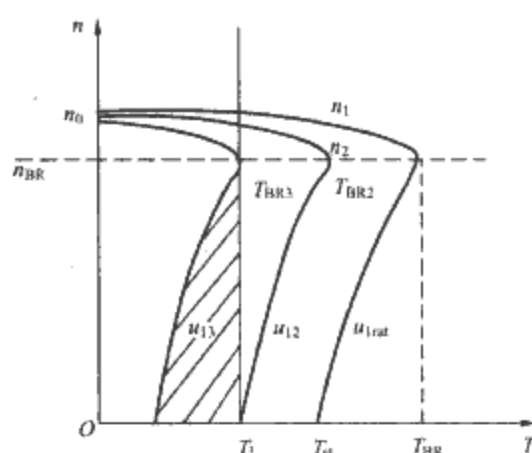


图 2.11-37 异步电动机调压时的机械特性

下降而逐渐增加的,这个制动力矩驱使电动机停机。当然,如果在此过程中,继续减少固态软起动器输出给电动机的电压,就会得到更大的制动力矩,使电动机停止得更快些。显然电压斜坡控制方式并不能对电动机停机进行有效的控制,例如无法增加在开始时的制动力矩,也无法减少在速度较小时的制动力矩。

对于水泵负载来说,其转矩特性是抛物线形(见图 2.11-38),所以在电动机电压下降以后的电动机转矩曲线与泵的转矩曲线有两个交点,例如图中电压为 U_{13} 时,一个交点在 n_{BR} ,另一个交点在下部的 n_4 。由于该点的负载转矩曲线斜率小于电动机转矩曲线斜率,所以,泵也可以在该点运行。也就是说只有在速度小于 n_4 以后,才能对泵的速度进行有效的控制,随着软起动器输出电压逐渐下降,泵的转速也随之下降。

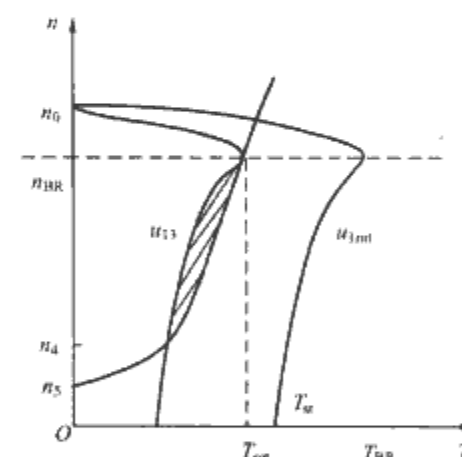


图 2.11-38 异步电动机机械调压时的机械特性在泵类负载中的作用

由上述分析可见,固态软起动器在软停止时的输出电压曲线应当如图 2.11-39 所示,即一接到停机指令,输出电压即由额定电压下降到 U_{dec1} 。 U_{dec1} 的选择是电动机在该电压下的最大转矩(颠覆转矩) T_{BR} 小于负载转矩,电动机才开始减速。 U_{dec1} 可选为 70%~50% 额定电压。当电压下降到

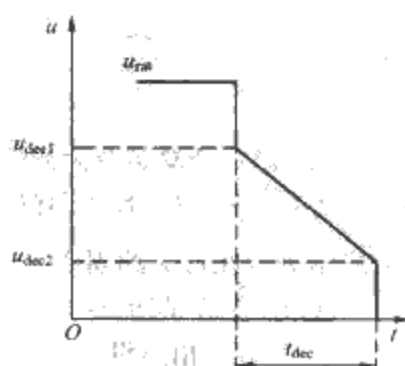


图 2.11-39 固态电动机软起动器的减速斜坡

U_{dec2} 时,电动机的转矩很小,基本上对电动机的停止已起不了多少作用,此时就可以关闭晶闸管输出。 U_{dec2} 大约小于 20% 额定电压。减速时间 t_{dec} 规定了斜坡电压从 U_{dec1} 下降到 U_{dec2} 所用时间。

对于水泵负载来说,尽管软停车可使泵缓慢停下来,但停车曲线并不能与水泵的停车曲线(见图 2.11-40)相配合。如图 2.11-41 所示,电动机的停车曲线在开始阶段下降很快,然后缓慢下降,它与水泵所要求的减速曲线有较大的流量(即速度)差距,这就要产生水锤现象。采用 TruTorque 转矩控制,就可以做到电动机停车曲线与水泵所要求的停车曲线相接近,从而消除水锤现象。

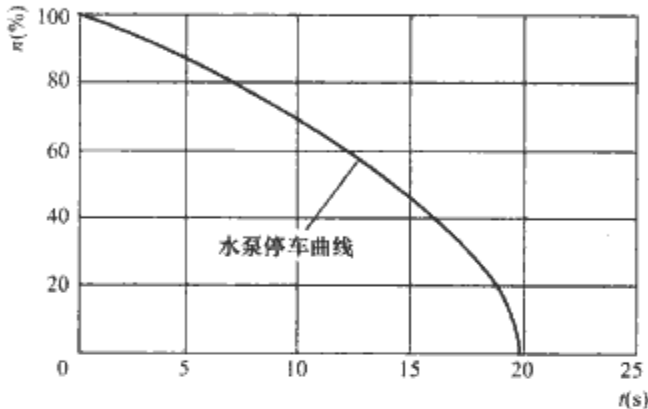


图 2.11-40 水泵所要求的停车曲线

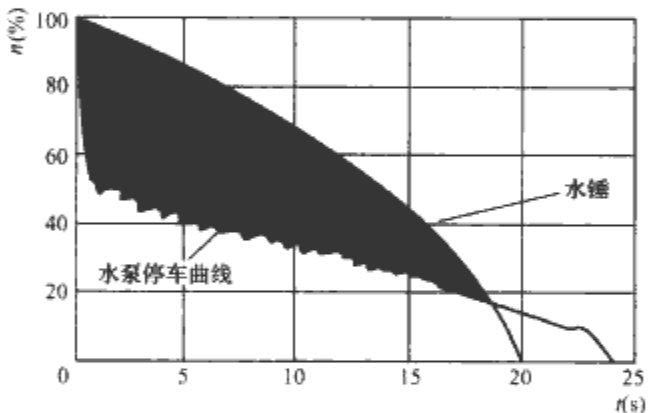


图 2.11-41 电动机软停车的曲线与水泵所要求的停车曲线不匹配会产生水锤现象

3.3.3 快速制动停车

有许多负载需要快速甚至准确停车,例如一些加工机床、起重运输机械等。这就要求固态电动机软起动器具有可控制的制动能力,通常采用的是能耗制动方式。

异步电动机的能耗制动状态,是将运转中的电动机从三相电源断开后,迅即在其定子两相绕组内通入直流电流,于是在定子建立一个不旋转的直流磁场,而旋转中的转子导体切割此磁场,从而在转子中产生感应电流,该电流与磁场产生的转矩正好与转子旋转方向相反,即为制动转矩。

异步电动机能耗制动时的机械特性如图 2.11-42 所示。它与异步电动机转子串电阻调速时的机械特性相似(见图 2.11-40 第一象限的曲线),它只是将第一象限的机械特性从 n_0 点向下平移到坐标原点,然后顺时针旋转 180° 。在定子直流励磁不变的情况下,改变转子回路外接电阻的大小,就改变了与最大转矩 T_{max} 对应的转速 n_{max} 的值,例如图中曲线 3 对应的转子回路电阻比曲线 1 的转子电阻大。在转子回路电阻值不变的情况下,改变定子直流磁场电流的大小,就相应改变了最大转矩 T_{max} 的大小,直流励磁越大, T_{max} 就越大,但它不改变 T_{max} 对应的转速值 n_{max} ,它们具有相似的制动曲线。再者,当电动机转速下降为零时,其制动转矩也降为零,所以,应用能耗制动能使生产

机械准确停车。

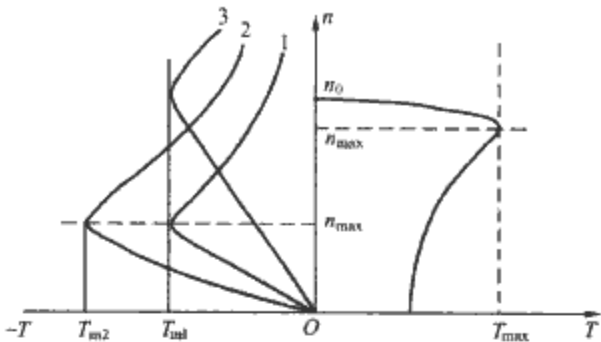


图 2.11-42 异步电动机能耗制动的机械特性

3.4 软起动器的保护监控功能

较好的软起动器都具有电动机的保护功能甚至监控功能。高端软起动器则具有非常完备的电动机保护和监控功能。下面介绍这些功能的定义和功用。

(1) 电动机过载保护。电动机过载保护可能是电动机运行中最重要保护,因为它关系到电动机的安全运行,也是最难做的保护,因为它与电动机的负载情况、冷热状态、环境条件有关。所以我们不能只看产品说明书上的名词,而要了解它是如何实现这种保护的。有的软起动器虽有过载保护但方法很粗糙,例如双金属片的热继电器就是一种简单粗糙的方法,有的则很精细。

通常现代的电子式过载继电器是根据电动机发热的 I^2t 作出的,按照(美国)国家制造商协会 NEMA 标准和美国国家标准研究所的规范 ANSI 51 规定,电动机过载等级分为 Class1~Class40 共 40 级。它是在 6 倍电动机额定电流情况下保护动作时间为 40s 来确定的。例如常用的 10 级、20 级和 30 级电动机过载保护曲线,分别是在通以 6 倍电动机额定电流延时 10s、20s 和 30s 跳闸的曲线(见图 2.11-43)。

(2) 电流不平衡保护。按 ANSI 46 规定,电流不平衡保护的可选值可在 10%~40%,电流不平衡百分比是相电流 I_{ph} 与平均电流 I_{av} 之间的差值,它可以按照以下的公式计算

$$\text{不平衡百分比} = \frac{I_{av} - I_{ph}}{I_{av}} \times 100\%$$

当电流不平衡超过规定值,保护动作延时可选择在 0.1~90s。

(3) 运行时无电流保护。可设定运行时的最小电流,其值选择在 2%~40%,如果软起动器电流小于此值,达到规定的延时后保护就会动作,延时时间可设定在 0.1~90s。

(4) 接地故障保护。按 ANSI 51 G 规定接地故障电流可设定在 1~100A,其保护动作延时可设定在 0.1~90s。

(5) 过电流保护。按 ANSI 51 规定,过电流保护可设定在 50%~800%,保护动作延时可在 0.1~90s 选择,如果选择最小延时,即电子销(Shearpin)保护,实际就是电流截止保护。如果过电流超过设定范围的上限,则会发生瞬时跳闸。

(6) 欠电流保护。按 ANSI 37 的规定,欠电流保护可设定在 10%~100%,延时时间可设定为 0.1~90s。对于水泵负载来说,如果水泵长期无水空转则会造成水泵汽蚀损坏,这项保护对于保护水泵是非常必要的。

(7) 过电压/欠电压保护。按 ANSI 59/27 规定,过电压/欠电压可设定在 10%~40%,过电压及欠电压等级都是独立设定的,其保护动作延时可设定在 0.1~90s。但过电压数值不可超过设备承受能力。

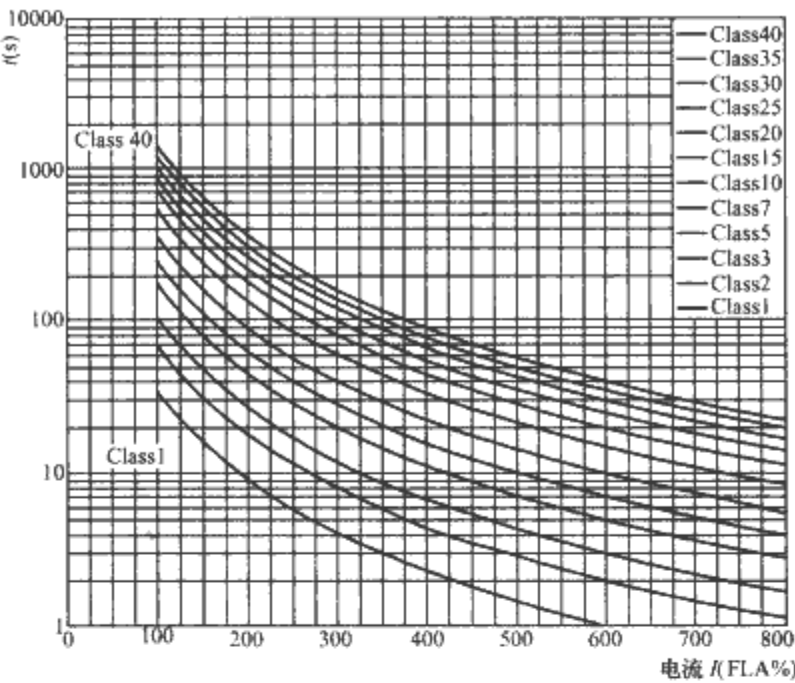


图 2.11-43 电动机保护过载等级曲线

(8) 频率过高/过低保护。按 ANSI 81 规定，它们的值可设定在 23~72Hz，保护动作延时可选择在 0.1~180s。

(9) 每小时起动次数保护和起动间隔时间保护。每小时起动次数可设定在 1~20 次，二次起动的间隔时间可设定在

- 1~200min。
- (10) 电动机热容量保护。固态软起动器会自动计算电动机起动运行的热容量，并提供保护。
- (11) 晶闸管短路保护。
- (12) 相序保护。按 ANSI 47 规定可选择 ABC（正相序）和 CBA（负相序），与相序无关。
- (13) 速度到达时间保护。速度到达时间设置了电动机从起动开始到达到满速的最长加速时间，可设置在 1~300s，超过设置值，保护便动作。它可以防止电机堵转或起动时间过长发热。
- (14) 零速堵转保护。此项保护需要外部输入指示零速的信号（120V AC）。如电动机堵转，保护就动作。

4 软起动器的主要技术参数和设计要点

4.1 软起动器的主要技术参数

软起动器有以下几个主要技术参数：额定电压、额定电流、额定频率、过载能力、使用类别、短时耐受电流等。当然这几个参数只是产品的基本要求，并不能代表产品的性能优劣，正如前面所说，软起动器的优劣是由它的起动模式、停车模式、保护测量监控和通信功能决定的。软起动器典型产品的技术参数见表 2.11-3。

表 2.11-3 软起动器典型产品的技术参数

型 号	PS 软件起动系列	JJR 软起动系列	VRQ 软起动系列	STR 软起动系列	NJR1 软起动系列
主回路电压 (V) (-15%~10%)	380	380	380, 660, 1140	380	380
额定电流 I_e	按电动机铭牌	按电动机铭牌	按电动机铭牌	按电动机铭牌	按电动机铭牌
额定频率 (Hz)	45~60	50	45~60	50	50
使用类别	风机、水泵	风机、水泵	风机、水泵及重载起动	风机、水泵	风机、水泵
短时耐受电流	8 倍额定电流	8 倍额定电流	8 倍额定电流	8 倍额定电流	8 倍额定电流
操作回路电源 (V) (-15%~10%)	220	220	220	220	220
冷却方式	自然冷却或风冷	自然冷却或风冷	自然冷却或风冷	自然冷却或风冷	自然冷却或风冷
起动方式	电压斜坡 恒流 点动 冲击	电压斜坡 恒流 重载起动	电压斜坡 恒流 恒流电压斜坡 点动 冲击	电压斜坡 恒流 冲击	电压斜坡 恒流 冲击
保护方式	电动机过载保护 转子堵转保护 电动机欠载保护 相不平衡保护 反相保护 大电流 晶闸管过载保护	电流 三相电流不平衡 过热 缺相 电动机过载	过载保护 堵转保护 起动时间过长保护 电动机欠载保护 相不平衡保护 缺相 旁路接触器故障保护	过载保护 过电流保护 缺相	过载保护 堵转保护 相序保护 过电压保护 欠电压保护 相不平衡保护 缺相
通信方式	Modbus Profibus DeviceNet	Profibus Modbus DeviceNet	Modbus (内置)、 Profibus (外置)、Device <Net (外置)、Ethernet (外置)	Modbus (内置)	Modbus (内置)
停止方式	软停可调 自由停车	软停可调 自由停车	软停可调 自由停车 泵控制	软停可调 自由停车	软停可调 自由停车
其 他	LCD 显示屏 起动多种电动机 集成高级电动机 保护 可编程信号继电器 集成旁路接触器	LCD 显示屏 可编程延时起动方式 可编程联锁控制 可编程故障触点输出 对输入电源无相序要求 动态故障记忆功能可在 线查找三相最大的起动电 流和最大运行电流	LCD 显示屏全中文 菜单 对输入电源无相序要求 可在线监控三相最大的 起动电流和最大运行电流 可在线监控三相输入电 压和三相输出电压	LCD 显示屏 汉显	LED 显示

4.2 软起动器的工作环境

软起动器的正常工作条件按 GB 14048.6 规定如下：

(1) 周围空气温度。周围空气温度不超过 40℃ 且 24h 内的平均值不超过 35℃，周围空气温度的下限为 0。但是有不少软起动器也可以在 40~50℃ 的环境温度下工作，只是在 40℃ 以上时，环境温度每升高 1℃，需降容 1.5%。

(2) 湿度。最高温度为 40℃ 时，空气的相对湿度不超过 50%。在较低温度下可以允许有较高的相对湿度，例如 20℃ 时达 90%。对由于温度变化偶尔产生的凝露应采取特殊的措施。

(3) 海拔。安装地点的海拔不超过 1000m。当用于海拔 1000m 以上的地方时，应根据用户和制造厂的协议进行设计和制造。

(4) 污染等级。除非制造厂另有规定，软起动器应可用于污染等级 3 的环境下，即有导电性污染，或由于凝露使干燥的非导电性污染变为导电性的。

(5) 冲击和振动。目前国家标准尚在考虑中。

(6) 运输和储存条件。如果软起动器的运输和储存条件，例如温度和湿度，不同于前面的规定条件，制造厂和用户应达成一个特殊协议。除非另有规定，运输和储存温度范围为 (-25~55)℃，短时期内(24h)可达 70℃。

4.3 软起动器的设计要点

固态软起动器主电路是由 6 个晶闸管组成的交流调压电路，每相的晶闸管都并联有压敏电阻和阻容吸收电路作浪涌保护。而整个软起动器的起动、停车、运行、保护、电气参数测量和监控、输入输出信号和通信功能都由一块以微电脑为核心的数字控制块来完成。专用微机控制电路及其电路软件设计，需要大量的计算机知识，无法在这里介绍清楚，只能简单介绍晶闸管参数的选择。

(1) 晶闸管电压的选择。设若上述晶闸管调压电路（软起动器）的三相输入电压（线电压）为 $U_L=380V$ ，则每个晶闸管承受的正反向峰值电压 U_{KSM} 就是电源电压波形的峰值： $U_{LRM}=\sqrt{2}U_L=\sqrt{2}\times 380V=537.3V$ 。晶闸管的反向重复峰值电压 U_{RRM} 应按 U_{LRM} 的 2~2.5 倍来选择，即 $U_{RRM}=(2\sim 2.5)U_{LRM}=1075\sim 1343V$ 。

(2) 晶闸管电流的选择。当晶闸管处于全导通状态时（也即软起动器输出全电压时）每相软起动器流过的电流为 I_L ，它的正负半周分别流过正向和反向晶闸管，所以每个晶闸管流过的电流有效值 $I_{RMS}=I_L/\sqrt{2}$ 。晶闸管的额定电流是指它的正向平均电流 $I_{F(AV)}$ ，即在一个周波中只流过正弦波的正半周，它在整个周波的平均值， $I_{F(AV)}=2/\pi I_{RMS}$ ， $I_{RMS}=\pi/2 I_{F(AV)}=1.57 I_{F(AV)}$ ，故有

$$I_{F(AV)}=\frac{2}{\pi}\times\frac{1}{\sqrt{2}}I_L=\frac{\sqrt{2}}{\pi}I_L$$

例如当软起动器的额定电流为 200A 时，则晶闸管的正向平均电流至少应当为 90A。

但对于软起动器来说，其负载是电动机，是感性负载；另外在起动过程中，晶闸管发热增加。图 2.11-44 和图 2.11-45 所示分别为 KP8-800-12-16 型晶闸管的通态功耗与通态平均电流、最大通态功耗与通态平均电流的关系曲线。KP8-800-12-16 型晶闸管的通态平均电流为 810A，断态不重复峰值电压 $U_{DSM}=1700V$ ，断态重复峰值电压 $U_{DRM}=1600V$ ，通态浪涌电流（通态不重复电流） $I_{TSM}=10kA$ 。由

图 2.11-44 和图 2.11-45 可见，如果通态功耗限制在 600W，在电阻负载下允许的通态平均电流在 180° 导通角时可达 480A，对 120° 导通角时为 430A，在 90° 导通角时只有 380A；而在电感负载电流为矩形波下，允许的通态平均电流在 180° 导通角时为 490A，在 120° 导通角时为 440A，在 90° 导通角时为 405A。因此在选择晶闸管时，应当考虑电流安全系数 K_A 。

$$I_{F(AV)}=K_A\times\frac{\sqrt{2}}{\pi}I_L$$

对于软起动器来说，它必须具有比一般变流装置大的过载能力，而晶闸管又是热惯性很小的器件，所以， K_A 值可以按软起动器的过载能力来考虑。例如 380V、160kW 的电动机，其满载电流约为 320A，若软起动器的过载能力为 500%，则需选用 $I_{F(AV)}\geq(5\times\sqrt{2}/\pi\times 320)A\geq 720A$ 。因此，可选用 KP8-800 晶闸管。

此外，在选择晶闸管时还要考虑短路试验电流。晶闸管可以承受短时浪涌电流，前述的 KP8-800-12-16 型晶闸管的通态浪涌电流与周波数的关系曲线如图 2.11-46 所示。

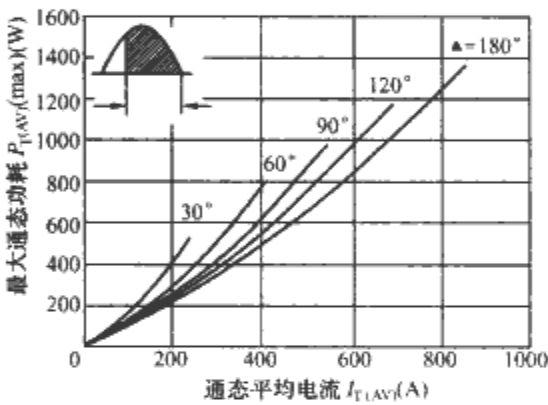


图 2.11-44 通态功耗与通态平均电流的关系曲线一

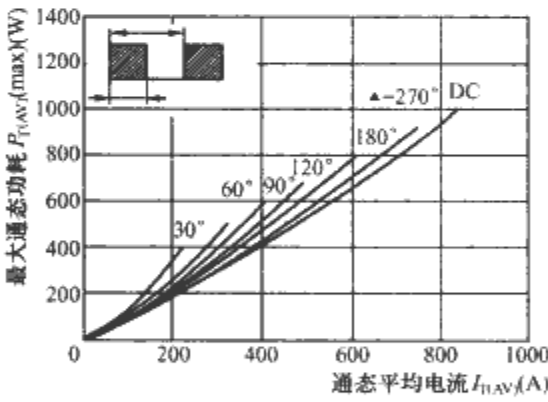


图 2.11-45 最大通态功耗与通态平均电流的关系曲线二

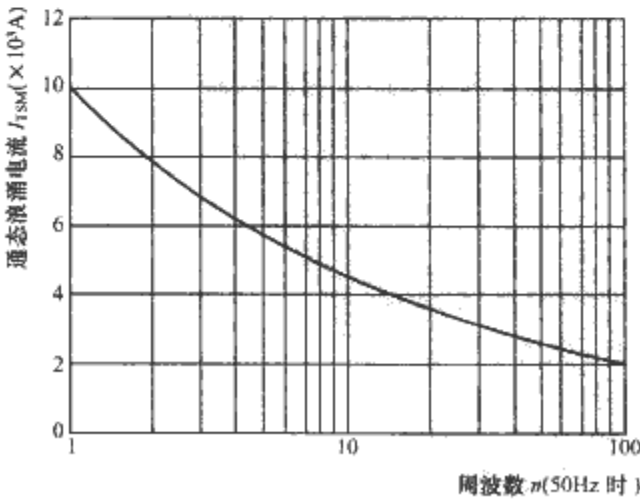


图 2.11-46 通态浪涌电流与周波数的关系曲线

由图可见, KP8-800-12-16 型晶闸管的最大浪涌电流可达 $I_{TSM}=10\text{kA}$, 如果计算为软起动器的输出电流 I_L 为 $I_L=\pi/\sqrt{2}I_{TSM}=22.21\text{kA}$, 则它只能用于 298 kW 以下的软起动器中。所以, 将其用在 160kW 电动机软起动器中是符合要求的。

晶闸管内部的等效结温范围是 $(-40 \sim 125)^{\circ}\text{C}$ ，必须加散热器使结温保持在规定的范围内。利用晶闸管的结壳热阻 R_{jc} 、管壳到散热器的接触热阻 R_{sa} 以及散热器基准点到环境基准点的热阻 R_{sh} 可以对选用的散热器作热计算，从而确定散热器的设计。

5 软起动器的应用、维护及其选择

5.1 软起动器的应用和维护

软起动器的高端产品都有很完善的故障预报和诊断功能,并有详细的记录器,可以记录软起动器运行中的事件,并带有时标。国内一些高端产品具有完善的保护与检测功能,同时配备全中文的大液晶显示界面,便于故障查找和设备维护与应用。

表 2.11-4 各种典型负载对应的起动转矩及所需软起动器类型

负载类型	起动转矩	软起动器选用类型
离心风机（阀门关闭）	10%~30%	通常为大惯量，要用过载时间长的（ I^2t 大的）软起动器
离心泵	10%~30%	通常要考虑消除水锤，要用带转矩闭环控制的软起动器
压缩机	10%~30%	根据电网容量验算，通常可以用过载能力不大的软起动器
自动扶梯（空载起动）	25%~50%	要采用有节能运行功能的软起动器，不要使用旁路接触器
抽油机	50%	要采用有节能运行功能的软起动器
带式输送机	50%~130%	要用高起动转矩（NEMA-C）型电动机，要用转矩闭环控制和速度反馈闭环控制的软起动器 [例如美国本秀（BENSHAW）的固态软起动器]
离心分离机	50%~90%	通常为大惯量，需要高起动转矩电动机和重载起动软起动器
搅拌机	100%~150%	需要克服静摩擦
混合机	50%~125%	需要克服静摩擦
风铲、风凿、碎片机	40%~50%	可以用简易型
飞轮式冲压机	40%~100%	通常为大惯量，起动时间长
钻床	25%~50%	可以用简易型固态软起动器
刨床	50%~120%	要用重载软起动器
磨床	25%~50%	可以用简易型固态软起动器
螺旋推进器	40%~100%	要用重载软起动器

表 2.11-5 根据对电动机保护和监控要求选择软起动器类型

被控设备要求	对软起动器的技术要求	软起动器水平
不重要的设备	不要求软起动器具有保护和监控功能，另外用热继电器保护电动机	采用低端的软起动器
重要的设备，但不要求无人值守の場合	要求软起动器具有较完整电动机保护功能和简单的测量监控功能	采用中端产品
重要的设备，并要求无人值守，采用自动监控の場合	要求软起动器具有完善的电动机保护功能和测量监控功能，并具有通信总线功能	采用高端产品

5.2 如何选择软起动器

感应电动机需要提供足够的转矩，以便将电动机及其负载从静止加速到全速；并能在不大于满载转矩设计值的各种转矩下有效保持全速运行；在需要停车时提供所要求的制动功能。对于各类负载，必须选择合适的电动机和软起动器，三者之间须配合良好。

5.2.1 根据负载性质选择

各种典型负载对应的起动转矩要求及需要的软起动器类型见表 2.11-4。表中列出的典型起动转矩是以电动机全负载转矩 (FLT) 为基数的百分值。作为一个通用原则, 电动机全电压下的堵转转矩与负载的起动转矩差得越多, 则越便于对起动过程的控制。

5.2.2 根据对电动机保护和监控要求选择

根据对电动机保护和监控要求选择所需要的软起动器类型, 见表 2.11-5。

5.2.3 根据软起动器的额定参数选择

固态软起动器的额定电压和电流应当与所控制电动机的额定参数相同。

第12章 控制与保护开关电器

1 控制与保护开关电器(CPS)的概念

1.1 控制与保护开关电器的概念

为了克服将采用不同考核标准的电器产品组合在一起使用时其保护特性、控制特性配合不协调的现象,方便用户选用,提高低压电控系统的运行可靠性,在20世纪的80~90年代,发展了一种新型电器即多功能集成化的控制与保护开关电器(CPS),其代表产品是法国TE公司的LD系列CPS产品和国内的KB0系列CPS热磁式产品。根据市场需求和新技术的发展,施耐德公司又于21世纪初推出了TeSys U系列CPS产品,国内则开发了KB0-T系列智能化、数字化的产品,目前正在研发新一代的系列化CPS产品。通过近20多年的发展,CPS产品逐步完善,形成多个系列、多个品种规格,基本满足了市场的需求。

1.1.1 控制与保护开关电器的基本概念

(1) 所属类型。控制与保护开关电器,简称“控制保护器”,是低压电器中的新型大类产品,其产品类别代号为“CPS”,是英文“Control and Protective Switching device”的缩写。CPS是除手动控制外还能够自动控制、带或不带就地人力操作装置的开关电器(设备)。

(2) IEC(国际电工委员会)和我国国家标准。IEC标准为IEC 60947-6-2,我国相应的国家标准为GB 14048.9—1998《低压开关设备和控制设备多功能电器设备》第2部分:控制与保护开关电器(设备),上述标准中规定了该产品类别代号为CPS。

标准规定的电气符号如图2.12-1所示。



图 2.12-1 标准规定的 CPS 的电气符号

(3) CPS 的多功能包括。

1) 主要的保护功能。与电流相关的过载、断相、短路等保护功能,以及与电压相关的欠电压、过电压等保护功能。这些功能经协调配合使得 CPS 能够在分断直至其额定运行短路电流(I_{cs})后连续运行。

2) 主要的控制功能。就地与远程的手动控制,以及自动控制等。

CPS 作为多功能电器,集成了隔离器、断路器(熔断器)、接触器、过载(或过电流)保护继电器、欠电压保护继电器等电器元件的主要功能,具有远距离自动控制和就地直接人力控制功能、机电信号报警功能(机械报警主要指面板指示,电气信号报警指通过指示灯等电信号指示)、协调配合的时间—电流保护特性,其具有的各种保护特性、控制动作特性在产品内部协调配合,即具有自配合性能。

1.1.2 低压配电与电控系统的基本构成及其特征

提出并发展 CPS,有其多方面的技术背景。在低压配电与电控系统中,为了实现对电动机(M)的控制与保护,有两种方式。一是采用传统的分立器件构成电控系统;如图2.12-2(a)所示,其主要电器元件构成为:熔断器(FU)+断

路器(QF)+接触器(KM)+热继电器(FR)。基本工作原理是:在正常情况下,由 KM 控制电路的通断;当过载或断相时,由 FR 控制 KM 切断电路;当短路故障出现时,由 QF(FU)断开故障电路。二是采用新型多功能集成化的控制与保护开关电器(CPS)构成的电控系统,如图2.12-2(b)所示。CPS 能够接通、承载和分断正常条件下包括规定的运行过载条件下的电流,且能够接通、在规定时间内承载并分断规定的非正常条件下的电流,如短路电流。CPS 具有过载和短路保护功能,这些功能经产品内部协调配合使得 CPS 能够在分断直至其额定运行短路电流(I_{cs})后连续运行(即 CPS 承受规定条件下的过电流后能够恢复运行)。CPS 可以是也可以不是由单一的电器组成,但总被认为是一个整体(或单元)。协调配合可以是内在固有的,也可以是遵照制造厂的规定经正确选取脱扣器而获得的。

除非另有说明,本章所述 CPS 均为由单一的电器组成,即单一结构型式的集成化的 CPS。

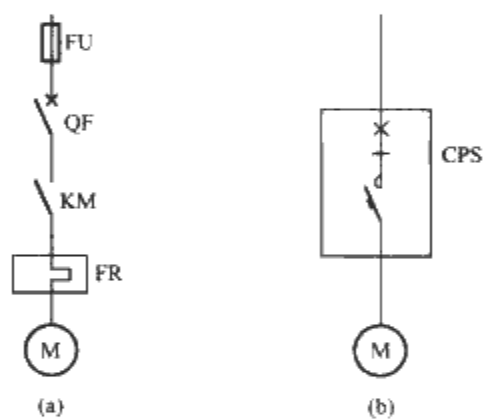


图 2.12-2 低压电控系统的构成

(a) 分立器件构成的电控系统;

(b) CPS 构成的电控系统

1.1.3 用传统的分立器件构成电控系统存在的不足

由于以下几方面的原因,要达到完善的选择性保护或是各种保护特性协调配合的目标,难度很大:将采用不同考核标准的电器产品组合在一起使用时,保护特性、控制特性配合不协调;设计人员选择电器元器件可能匹配不当;成套厂购置不同生产厂家的元器件产品的质量不同和装配调整不当;用户现场整定不当;元器件生产厂家推广和技术服务不到位。

这些原因经常导致电控系统中会出现以下现象:接触器的主触头烧毁,甚至造成飞弧,使故障扩大,影响邻近供电回路;断路器在系统出现短路故障时不能正常分断电路;保护装置不能起到保护电动机的功能,造成误动或拒动等。具体分析如下:

一般接触器的接通能力为10~12倍的额定电流,分断能力为8~10倍额定电流,当线路中出现超过接触器主触头分断能力的短路电流时,接触器的主触头在短路电流产生的强大电动力作用下,极易发生接触器的主触头烧毁并同时产生飞弧,导致事故的进一步扩大,甚至造成人身伤害。此类故障在工矿企业电气事故中占有相当高的比例。因此,在一些工程设计和建设中,为了达到断路器与接触器动作时间的

配合,应采用耐受电流大的接触器和限流型断路器,通常采用放大接触器容量这个既不合理又不经济的办法。

电动机作为用电负载,通常使用在支路或线路末端。对于大多数直接起动的中小型电动机,容量最大的一般为30kW或45kW及以下。过去由于采用终端分立控制,当负载点发生短路故障时,短路电流一般在10kA左右。但是,随着配电与控制技术的发展,目前的一些工矿企业为了减少电能传输过程的损耗,方便运行管理,往往将一些电动机的控制设置于变配电站内的电动机控制中心(MCC)内,使得电动机保护用的断路器与配电变压器的低压母排之间距离很近,导致控制电器出线端的阻抗很小,使得电动机功率虽小,而断路器及接触器负载端的短路电流却很大。目前,断路器短路分断能力随框架电流增大而增大,小电流的断路器分断能力较小,或者在工程设计中疏忽了分断能力的校验,容易出现断路器在系统出现短路故障时不能正常分断电路的问题。

传统电动机保护型断路器作为电动机的过载保护和短路保护存在着以下缺陷:电动机保护型断路器只有二段保护即过载长延时和短路瞬动保护,且大多数断路器的整定电流都是不可调整型。这样,在实际工程选用中,电动机选用的断路器额定电流一般是向上取一个最接近的数值,加之大多数断路器没有断相保护功能,往往起不到对电动机的保护作用。为此,需采用增加单独的热继电器作为过载和断相保护,后者的反时限整定电流也只是较粗的调节,各种元器件的特性配合很难达到圆满地协调选择,而且保护功能比较简单。

1.1.4 CPS 实现多功能的基本原理

如图2.12-3所示为CPS产品实现多功能的原理图。图中的虚线表示机械关联,实线表示电气关联。在电气线路上,通过采用一组主电路接触组(包括动、静触头与灭弧系统)替代了至少的两组主电路接触组(如断路器+接触器)。通过采用模块化的单一产品结构型式、单一的操动机构同时与各种保护单元(包括过载反时限保护、过电流定时限保护、短路瞬动保护)以及控制保护单元相关联实现控制与保护功能,且具有面板指示及机电信号报警功能。

图2.12-3(a)与图2.12-3(b)所示为KB0系列CPS的原理图,该产品采用传统的双金属片和螺管电磁铁作为保护装置;图2.12-3(c)与图2.12-3(d)所示为TeSys U系列CPS的原理图,该产品的控制保护单元为电子式,通过电流互感器采样,MCU发出指令控制产品实现接通、分断和脱扣。

1.2 分类

1.2.1 通常按 IEC 和 GB 标准的分类

- (1) 极数。2、3、4极。
- (2) 电流种类。交流或直流。
- (3) 操作方式。电磁铁、人力、电动机操作。
- (4) 控制方式。自动——由主令辅助开关或程序控制器控制、非自动——用手柄或按钮控制。
- (5) 过载后的再扣方式。自复再扣、就地人力再扣、远距离再扣。
- (6) 短路后的重合闸方式。CPS动作后能够远距离重合闸、CPS动作后不能够远距离重合闸。
- (7) 短路后是否需要更换可更新的短路保护元件。不需要更换可更新的短路保护元件,如正常操作的断路器;需要更换可更新的短路保护元件,如熔断体。

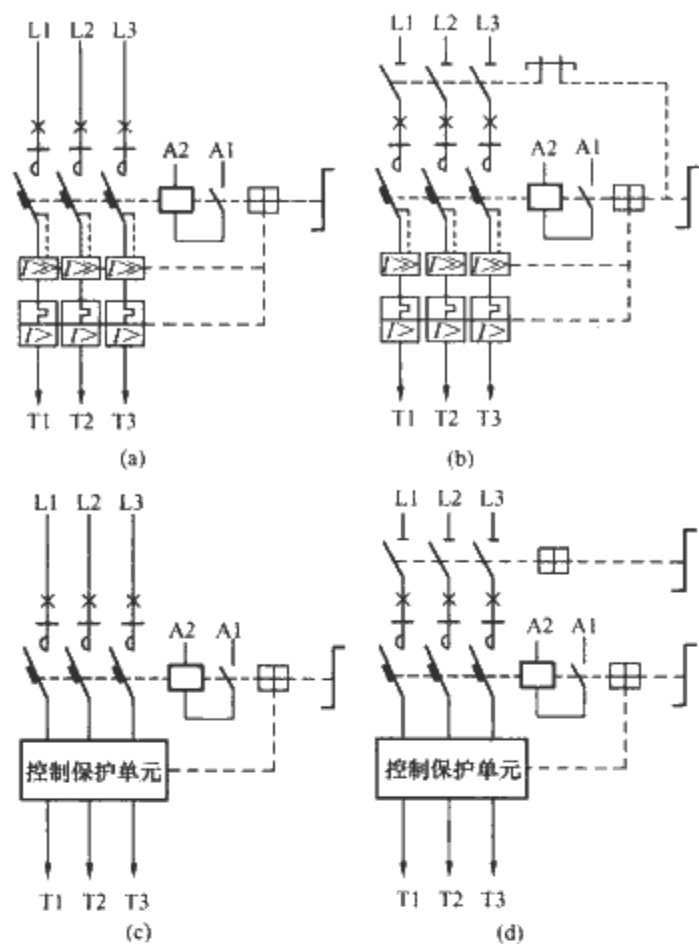


图 2.12-3 CPS 产品实现多功能的原理图

(a) KB0 不带隔离功能; (b) KB0 带隔离功能;

(c) TeSys U 不带隔离功能; (d) TeSys U 带隔离功能

(8) 按(过载脱扣器的)用途分类。配电用、电动机控制与保护用。

(9) 按控制电动机起动性质分类。频繁起动电动机控制、不频繁起动电动机控制。

(10) 按控制电动机方向分类。单向、可逆(包括双向)。

(11) 按是否适用于隔离(带隔离功能触头)分类。不带隔离功能、带隔离功能。

(12) 按控制电路电压性质分类: AC、DC。

1.2.2 应用中按 CPS 产品的构成及其控制对象分类

(1) 基本型。主要包括主体[含短路保护的主电路接触组和电磁传动机构、操动机构(就地操作)]、控制器(含报警、脱扣、控制)、辅助触头、扩展功能模块与附件等,实现对负载的控制与保护。

(2) 可逆型(双向)。以CPS基本型作为主开关,与机械联锁和电气联锁等附件或可逆控制模块组合,构成可逆型控制与保护开关电器,适用于电动机的可逆或双向控制与保护。

(3) 双电源自动转换开关电器型。以CPS基本型作为主开关,与电压继电器、机械联锁、电气联锁等附件或双电源控制器组合,构成双电源自动转换开关电器(ATSE)。

(4) 减压起动器型。以CPS基本型作为主开关,与适当接触器、时间继电器、机械联锁和电气联锁或相应的减压起动模块构成星—三角减压起动器型、自耦减压起动器型、电阻减压起动器型,实现电动机的减压起动和多种保护。

(5) 双速(或三速)控制器型。以CPS基本型作为主开关,与适当的接触器、电气联锁等附件或双速(或三速)控制模块组合,构成双速(或三速)控制器,适用于双速(或三速)电动机的控制与保护。

(6) 带保护控制箱型。以CPS基本型作为主开关,安装在标准的保护箱内组成动力终端箱,适用于户外以及远程

单独负载的控制与保护。

(7) 其他派生型式。消防型、隔离型、插入式板后接线型等。

1.3 CPS 的主要特点

CPS 作为多功能电器,具有功能集成化、结构模块化、体积小、防护等级高、分断能力高、飞弧距离短、寿命长、连续运行、可靠性高、安装使用及维修操作方便等优点。其产品的对比优势主要体现在:

1.3.1 与分离电器构成的系统相比

(1) 具有控制与保护自配合的特性。CPS 集控制与保护功能于一体,相当于断路器(熔断器)+接触器+热继电器+辅助电器,很好地解决了分离元件不能或很难解决的元件之间的保护与控制特性匹配问题,使保护与控制特性配合更完善合理(具有反时限、定时限和瞬时三段保护特性)。只要根据负载功率或电流即可正确选择单一产品,代替以往的包括自电源进线至负载端的各种电器,大大减轻了设计人员的工作量。

(2) 具有较高的运行可靠性和系统的连续运行性能。CPS 在分断短路电流后无需维护即可投入使用,即具有分断短路故障后的连续运行性能。CPS 在进行了不小于 1500 次的 AC-44 电寿命后紧接着完成分断额定运行短路电流(I_{cs})试验后,仍具有不小于 1500 次的 AC-44 电寿命,这是由断路器等分立器件构成的系统所难以达到的。CPS 的这一特性极大地提高了系统的运行可靠性和系统的连续运行性。

1.3.2 与塑壳断路器相比

(1) 具有分断能力高、飞弧距离短的特性。CPS 为双断点结构,采用限流分断技术,其额定运行短路分断能力 I_{cs} 的分断时间很短,达到塑壳断路器的领先水平,接近熔断器的限流水平,大大限制了短路电流对系统的动、热冲击。

(2) 与传统的热磁式塑壳断路器构成的保护系统相比具有保护整定电流均可调整的特性。CPS 的反时限电流和定时限电流整定值在面板上均可进行调整,即除了常规的热保护电流可根据负载功率进行整定外,过电流保护整定电流也可在面板上进行调整[配电负载的调整范围为(3~6) I_N ,电动机负载的调整范围为(6~12) I_N]。克服了塑壳断路器的短路保护整定电流出厂后用户无法调整的缺点,使得 CPS 产品即使安装在线路末端,短路电流较小时,同样具有很好的线路短路保护功能。

1.3.3 与接触器性能相比

(1) 寿命长。CPS 的机械寿命达 500~1500 万次,电寿命 AC-43 为 120~200 万次,均与接触器产品的较高水平相当。

(2) 操作方便。既可就地手动操作,又可远距离实现自动控制功能。

1.3.4 其他特点

(1) 安装角度灵活。横装、垂直安装、水平安装均不影响使用性能。可广泛应用于紧凑型成套装置中,包括固定式或抽屉式的 MCC 柜中,特别是对于 15~22.5kW 及以下可在 1/4 和 1/2 抽屉中应用。

(2) 安全可靠、防护等级高。板前、插入式板后接线的接线端子均具有防触指功能,可配备防护等级直至 IP65 的高防护等级外壳,特别适用于民用建筑的潮湿场所、地下室、水泵房、煤矿、港口、船舶、石化等领域,可替代目前的电磁起动器、保护式和组合式起动器等产品。

1.4 CPS 的用途

由于 CPS 同时具有了保护电器和控制电器的双重功能,特别适用于:

(1) 冶金、煤矿、钢铁、石化、港口、船舶、铁路等领域的电动机控制与保护系统。

(2) 现代化建筑中的照明、电源转换、泵、风机、空调等电气控制与保护系统。

(3) 电动机控制中心(MCC),尤其是智能化电控系统或要求高分断能力的 MCC(如要求 I_{cu} 或 I_{cs} 达到 80kA 以上的配电控制与保护系统)。

(4) 工厂或车间的单机控制与保护(相当于动力终端)。

2 名词术语、结构与工作原理

2.1 名词术语

控制与保护开关电器(设备)[Control and Protective Switching devices (or equipment), CPS]:除手动控制外还能够自动控制、带或不带就地人力操作装置的开关电器(设备)。CPS 能够接通、承载和分断正常条件下包括规定的运行过载条件下的电流,且能够接通、在规定时间内承载并分断规定的非正常条件下的电流,如短路电流。CPS 具有过载和短路保护功能,这些功能经协调配合使得 CPS 能够在分断直至其运行短路额定值(I_{cs})后连续运行(指 CPS 承受标准中规定条件下的过电流后能够恢复运行)。CPS 可以是也可以不是由单一的电器组成,但总被认为是一个整体(或单元)。协调配合可以是内在固有的,也可以是遵照制造厂的规定经正确选取脱扣器而获得的。

适用于隔离的 CPS(CPS suitable for isolation):在断开位置上符合隔离功能有关要求的 CPS。

直接 CPS(direct-on-line CPS):将线电压直接加到电动机接线端子上的 CPS。

可逆 CPS(reversing CPS):用于起动电动机,当电动机可能尚在运转时反接电动机先前接线使其反向运转的 CPS。

双向 CPS(two-direction CPS):用于起动电动机,仅在电动机停转时反接电动机先前接线使其反向运转的 CPS。

2.2 结构

如图 2.12-4 所示为国内研制(上海电器科学研究所集团有限公司开发、浙江中凯电器有限公司制造)的 KB0 系列 CPS 产品构成示意图,如图 2.12-5 所示为法国施耐德公司 TeSys U 系列 CPS 产品构成示意图。

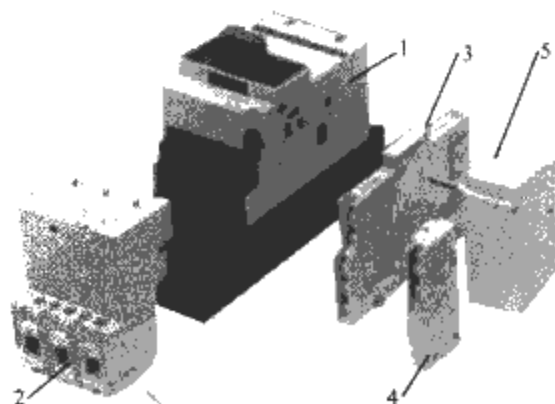


图 2.12-4 国内研制的 KB0 系列 CPS 的构成
1—主体;2—过载脱扣器;3—辅助触头模块;
4—分励脱扣器;5—远距离再扣器

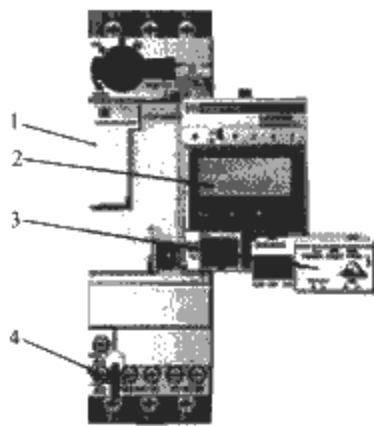


图 2.12-5 法国施耐德公司的
TeSys U 系列 CPS 的构成
1—主体（动力底座）；2—控制保护模块；
3—通信接口模块；4—辅助触头模块

2.3 工作原理

下面以 KB0 系列 CPS 产品为例，介绍单一结构型式的集成化 CPS 的基本结构及工作原理。

2.3.1 主体

主体如图 2.12-6 所示，具有短路保护、自动控制、就地操作与指示功能，主要由躯壳、主体面板、电磁传动机构、操动机构、主电路接触组（包括触头系统、短路脱扣器）等部件构成。

(1) 电磁传动机构。如图 2.12-7 所示，电磁传动机构主要由线圈、铁心、控制触头、机械传动机构及基座等组成（类似于接触器的电磁控制系统，具有欠电压保护功能），能接受通断操作指令，控制主电路接触组中的主触头接通或分断主电路。

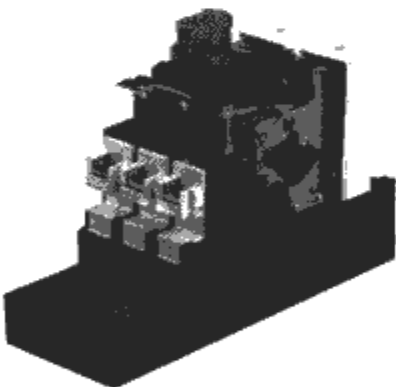


图 2.12-6 主体

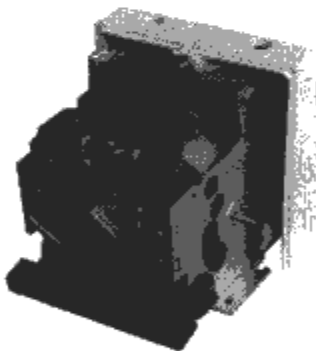


图 2.12-7 电磁
传动机构

(2) 操动机构。如图 2.12-8 所示，能接受每极主电路接触组的短路信号和来自热磁脱扣器（见 2.3.2）的故障信号，通过控制触点切断线圈回路由电磁操动机构分断主电路。故障排除后由操作手柄复位。KB0 操动机构的工作状

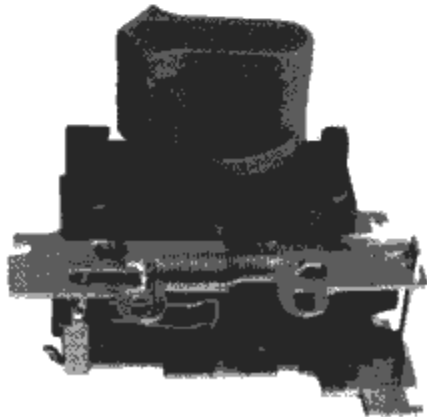


图 2.12-8 操动机构

态在主体面板上的符号及指示器位置含义如图 2.12-9 所示。

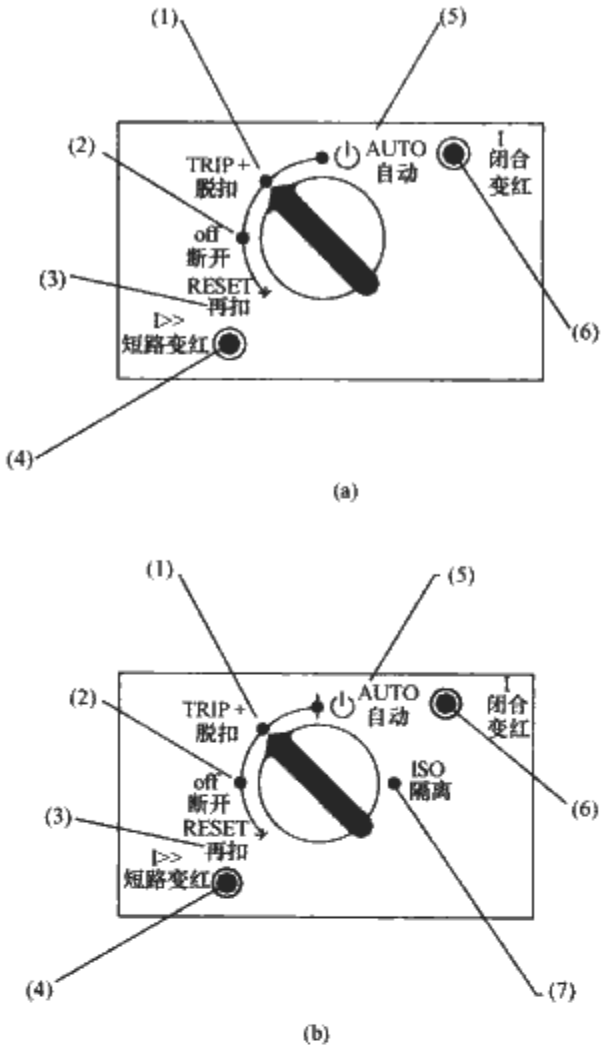


图 2.12-9 主体面板
(a) 不带隔离功能（基本型）的主体面板；
(b) 带隔离功能的主体面板

(3) 主体面板。如图 2.12-9 所示。

1) 脱扣位置。在接通的电路中，如出现过载、过电流、断相、短路等故障以及远程分励脱扣时，产品内对应的功能模块动作。此时，主触头和线圈控制触头均处于断开位置。

2) 断开位置。线圈控制触头处于断开位置，KB0 主触头保持在断开位置。

3) 再扣位置。操作手柄旋至该位置时才可已脱扣的 KB0 正常复位再扣。

4) 短路故障指示器。正常工作时，红色标记不可见；短路脱扣时，标记呈红色。

5) 自动控制位置。KB0 内部的线圈控制触头在闭合位置，此状态下通过线圈控制电路的通断可远程自动控制。

6) 通断指示器。当 KB0 主电路接通时，标记呈红色；当 KB0 正常断开时，红色标记不可见。

7) 隔离位置。将 KB0 旋钮逆时针旋至此位置，内部主电路已处于断开隔离状态。

(4) 主电路接触组（包括触头系统、短路脱扣器）。如图 2.12-10 所示，主电路接触组由动、静双断点触头（序号 2、1）、栅片灭弧室（序号 8）和限流式快速短路脱扣器（序号 4）动作机构组成，每极相互独立。主电路接触组中装有限流式快速短路脱扣器与高分断能力的灭弧系统，能实现高限流特性（限流系数小于 0.2）的短路保护，其脱扣电流整定值不可调整，仅与框架等级有关，其整定值为 $(16 \pm 20\%) I_n$ (I_n 为框架等级电流)。在负载发生短路时，短路脱扣器（序号 4）快速（2~3ms）动作通过拨杆（序号 5）打开主触头，同时带动操动机构切断控制线圈电路使主电路各极全部断开。

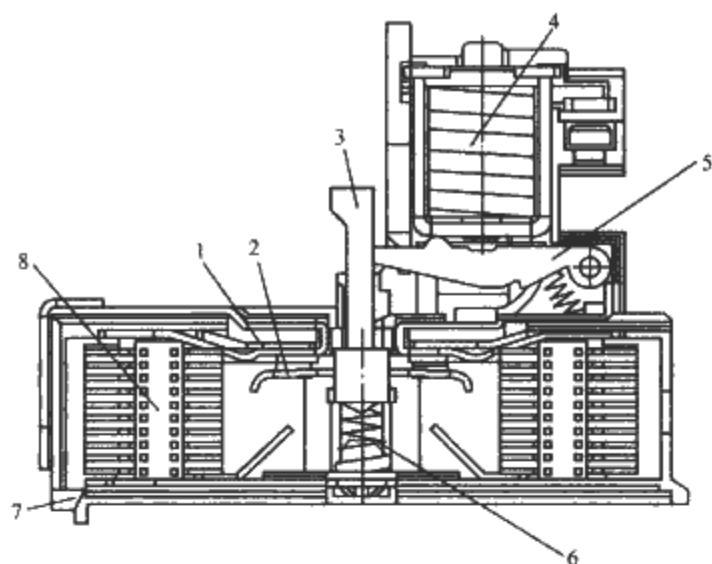


图 2.12-10 主电路接触组
1—静触头；2—动触头；3—触头支持；
4—快速短路脱扣器；5—拨杆；6—触头
弹簧；7—壳；8—栅片灭弧室

2.3.2 热磁脱扣器

热磁脱扣器如图 2.12-11 所示。具有过载和过电流保护功能，具有延时、温度补偿、断相和较低过载下良好的保护功能，整定电流值包括热过载反时限脱扣电流、过电流定时限电流均可调。

按用途可分为多种类别规格：电动机保护型和配电保护型，不频繁起动和频繁起动电动机型等。

热磁脱扣器的面板。如图 2.12-11 (b) 所示。

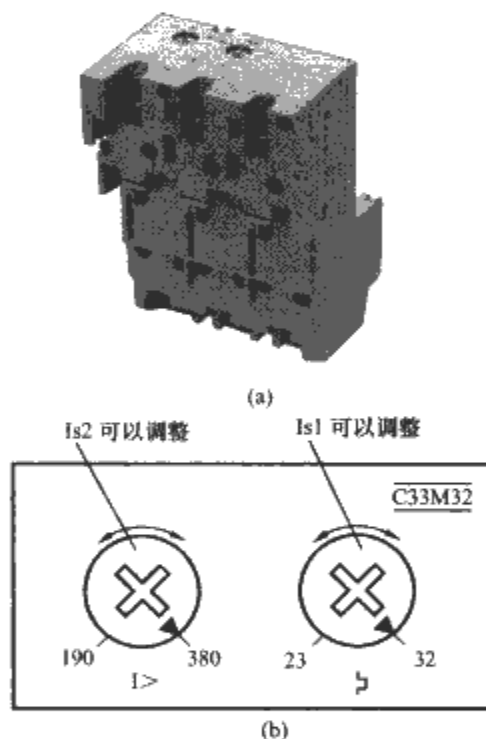


图 2.12-11 热磁脱扣器
(a) 热磁脱扣器外观；(b) 热磁脱扣器面板图

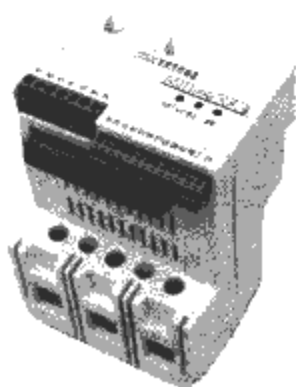


图 2.12-12 智能控制器

2.3.3 智能控制器

智能控制器如图 2.12-12 所示。智能控制器基于高性能微处理器、嵌入式软件和总线通信技术，可实现电动机负载、配电电路的电流保护（过载、堵转、阻塞、接地/漏电、断相、三相电流不平衡等）、电压保护（欠电压、过电压、起动超时、相序故障等）、设备保护（欠电流、欠功率等）、温度保护，具有通信、维护管理、自诊断功能，且脱扣级别和多种保护参数均可整定。

2.3.4 功能模块及性能指标

(1) 辅助触头模块。如图 2.12-13 所示，辅助触头包括与主电路触头联动的机械无源触头（简称“辅助触头”）和用于手柄位置指示和故障指示的机械无源信号报警触头（简称“信报触头”）。

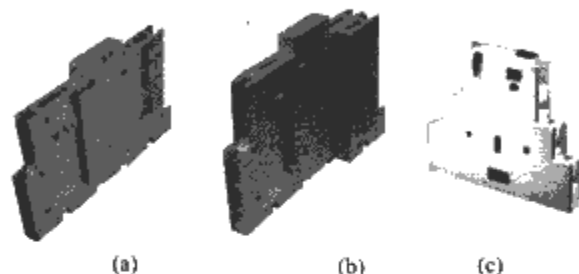


图 2.12-13 辅助触头模块
(a) F21□；(b) F32□；(c) L12 或 L21

辅助触头为电气上分开的。

信报触头可指示操作手柄的 AUTO（接通）位置、主电路的过载（或过电流、断相）故障、短路故障。

(2) 分励脱扣器。如图 2.12-14 所示，实现 KBO 远程脱扣和分断电路的功能。

(3) 远距离再扣器。如图 2.12-15 所示，实现 KBO 操动机构远程再扣（和复位）功能。



图 2.12-14 分励脱扣器

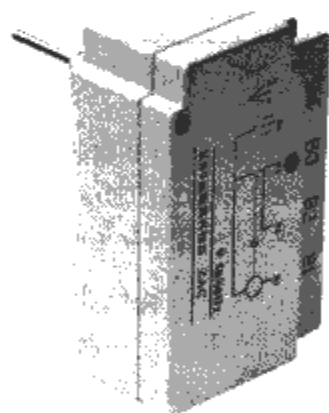


图 2.12-15 远距离再扣器

2.3.5 隔离型

KBO 隔离型产品适用于配电电路和电动机电路中电源的隔离。

KBO 隔离型产品既可满足主电路隔离的要求，也可满足控制回路隔离的要求，并可通过操作手柄清楚地显示其状态。

KBO 隔离型产品的外形及安装尺寸同基本型。

3 主要技术参数与性能

3.1 技术参数

3.1.1 额定参数

(1) 额定电压。CPS 的额定电压包括额定工作电压 (U_e)、额定绝缘电压 (U_i)、额定冲击耐受电压 (U_{imp}) 等。

(2) 电流和功率。CPS 用下列电流和功率加以规定：约定自由空气发热电流 (I_{th})、约定封闭发热电流 (I_{the})、额

定工作电流 (I_e) 或额定工作功率等。

(3) 额定频率。CPS 的额定频率可以有一组额定值或额定频率范围, 也可交直流两用。

(4) 额定工作制。额定工作制包括 8h 工作制、不间断工作制、断续周期工作制 (或断续工作制)、短时工作制、周期工作制等。

对于控制断续工作制电动机的 CPS, 过载继电器和电动机之间热时间常数的不同有可能使热保护不适用于过载保护。对于此类过载保护问题, 应由制造厂和用户协商解决。

3.1.2 使用类别

(1) 标准使用类别。表 2.12-1 列出了标准使用类别的代号及典型用途。其他的使用类别由制造厂和用户协商。

表 2.12-1 标准使用类别的代号及典型用途

使用类别①	典 型 用 途
AC-40	配电电路, 包括由组合电抗器组成的电阻性和电感性混合负载
AC-41	无感或微感负载、电阻炉
AC-42	绕线转子电动机: 启动、分断
AC-43	笼型感应电动机: 启动、运转中分断②
AC-44	笼型感应电动机: 启动、反接制动或反向运转、点动
AC-45a	放电灯的通断
AC-45b	白炽灯的通断
DC-40	配电电路, 包括由组合电抗器组成的电阻性和电感性混合负载
DC-41	无感或微感负载、电阻炉
DC-43	并励电动机: 启动、反接制动或反向运转、点动、直流电动机在动态中分断
DC-45	串励电动机: 启动、反接制动或反向运转、点动、直流电动机在动态中分断
DC-46	白炽灯的通断

① 第 1 位数 (十位数) 表示 CPS, 第 2 位数 (个位数) 表示典型用途。

② AC-43 类别可用于偶然的限定时间内的点动 (微动) 或反向 (反接制动), 如机床的启动; 这一限定时间内的操作次数既不应超过每分钟 5 次, 也不应在 10min 内超过 10 次。

(2) 基于试验结果选择使用类别。如果 CPS 已进行过一种使用类别或任一种参数组合 (例如最高工作电压和电流等) 的试验, 则只要下述条件成立就可以选用于其他的使用类别, 而不必进行更多的试验, 这种条件为: 试验电流、电压、功率因数或时间常数、操作循环次数、闭合和断开时间, 所选用的使用类别的试验电路不比设备已进行过试验的数值严酷, 且温升已在不间断工作制的电流下通过验证。

(3) 交流电动机控制负载使用类别的应用。

1) 一个旋转方向, 断开在正常使用条件下运转的电动机 (使用类别 AC-42、AC-43)。

2) 两个旋转方向, 但电动机只有在 CPS 断开且电动机完全停转以后, 才能实现在第二个方向的运转 (使用类别 AC-42、AC-43)。

3) 一个旋转方向, 或如上段所述的两个旋转方向, 但具有不频繁点动的可能性。直接 CPS 通常用于这种工作条件 (使用类别 AC-43)。

4) 一个旋转方向且有频繁点动 (微动), 直接 CPS 通常用于这种工作条作 (使用类别 AC-44)。

5) 一个或两个旋转方向, 但具有不频繁的反接制动来停止电动机的可能性, 如果带有转子电阻制动器, 则反接制

动与此有关。在这种工作情况下, CPS 可用于定子电路 (使用类别 AC-42)。

6) 两个旋转方向, 具有当电动机在一个方向上运转时反接电动机电源接线的可能性 (反接制动或反向运转), 以切断正常工作条件下尚在运转的电动机电源并使其反向运转。直接可逆 CPS 通常用于这种工作情况 (使用类别 AC-44)。

3.1.3 控制电路

控制电路指 CPS 的电磁控制系统的电路, 用于实现 CPS 接通、分断的自动与面板手动控制。

控制电路的特性包括电流种类、额定频率 (如果是交流的话)、额定控制电路电压 U_c 、额定控制电源电压 U_s 。

额定控制电路电压和额定频率 (如适用的话) 决定控制电路的工作和温升特性参数。正确的工作条件是控制电源电压值既不应小于 85% 额定控制电源电压 (当控制电路通过最大电流时), 也不应超过 110% 额定控制电源电压。

3.1.4 辅助电路

辅助电路包括 CPS 的辅助触头 (接触组) 电路、信号报警电路, 用于 CPS 构成的电气系统的控制、信号指示、电气联锁等。

辅助电路的特性为每个电路中的触头 (a 触头、b 触头等) 数量、种类及其额定值, 额定值包括额定电压如额定工作电压 (U_e)、额定绝缘电压 (U_i)、额定冲击耐受电压 (U_{imp}), 电流如约定自由空气发热电流 (I_{th})、约定封闭发热电流 (I_{thc})、额定工作电流 (I_e) 以及额定频率等。

3.1.5 继电器或脱扣器

3.1.5.1 继电器或脱扣器的型式

- (1) 分励脱扣器。
- (2) 欠电压和欠电流继电器或脱扣器。
- (3) 过电流继电器或脱扣器。
 - 1) 过载继电器或脱扣器: ①瞬时过载继电器或脱扣器; ②定时限过载继电器或脱扣器; ③反时限过载继电器或脱扣器。
 - 2) 短路继电器或脱扣器: ①瞬时短路继电器或脱扣器; ②定时限短路继电器或脱扣器。

CPS 具有上述过载继电器或脱扣器和短路继电器或脱扣器组合功能。

(4) 其他继电器或脱扣器 (例如断相继电器、与电动机热保护器相连的控制继电器、剩余电流继电器)。

3.1.5.2 特性量 (额定值)

- (1) 分励脱扣器、欠电压 (欠电流) 继电器或脱扣器。
 - 1) 额定电压 (电流)。
 - 2) 额定频率。
 - 3) 动作电压 (电流)。
- (2) 过电流继电器或脱扣器。
 - 1) 电流整定值 (或整定值的范围)。
 - 2) 额定频率, 如需要的话 (如电流互感器操作的过载继电器)。
 - 3) 时间—电流特性 (或特性的范围)。
 - 4) 脱扣级别 (如适用的话)。
 - 5) 极数。
 - 6) 继电器或脱扣器的类型: 热、电磁、固态 (电子)。

3.1.5.3 过载继电器或脱扣器的标志和电流整定值

过载继电器或脱扣器是根据其电流整定值 (或电流整定值范围的上限值和下限值) 和其适用的脱扣级别标志的。电

流整定值（或电流整定值范围）应标志在继电器或脱扣器上。

3.1.5.4 过电流继电器或脱扣器的时间—电流特性

（1）定时限延时。继电器或脱扣器的延时时间与过电流无关。若延时时间不可调，脱扣时间整定值用 CPS 的断开时间来表示，单位为 s；若延时时间可调，则用断开时间的最小值和最大值来表示。

（2）反时限延时。制造厂应以曲线簇的形式提供时间—电流特性，且应表明从冷态开始，反映在继电器或脱扣器的动作范围以内，断开时间如何随电流变化。制造厂应以适当的形式表明这些曲线的误差。这些曲线应对应最小电流整定值和最大电流整定值给出，若给定电流整定值的时间整定值是可调的，特性上应附加给出每一时间整定值的最小和最大值。

3.1.5.5 周围空气温度的影响

除非另有规定，过电流继电器或脱扣器除热型式的以外，其动作值在（-5~40）℃的范围内与周围空气温度无关。

对于热式继电器或脱扣器，时间—电流特性与规定的周围空气温度有关，并且是过载继电器无预负载（即自冷态开始）的条件下做出的。

该周围空气温度值应清楚地表示在时间曲线上；其优选值为 20℃或 40℃。

过载继电器或脱扣器应能在周围空气温度（-5~40）℃范围内时动作，且制造厂应说明周围空气温度变化对过载继电器或脱扣器特性的影响。

3.2 结构和性能要求

3.2.1 结构要求

CPS 的结构要求包括材料、载流部件及其连接、电气间隙和爬电距离、操动器、触头位置的指示、适用于隔离的 CPS 的附加安全要求、接线端子、接线端子的识别和标志、具有中性极的 CPS 的附加要求、保护接地的要求、CPS 的外壳等。

3.2.2 性能要求

3.2.2.1 动作（操作）

CPS 的结构应保证其自由脱扣。

CPS 承载最大额定工作电流达到热平衡时，不应因其操作所引起的冲击而导致脱扣器动作。

无闭合指令时，继电器和脱扣器的再扣操作不应导致 CPS 闭合。

动力操作的 CPS 的动作范围、欠电压继电器和脱扣器的动作范围、分励脱扣器的动作范围、过电流继电器或脱扣器的动作范围（包括过载情况下断开、短路情况下断开）等，均在产品标准中有明确的规定。这些具体的规定与实现不同保护和控制功能的断路器、接触器等的要求应一致。

3.2.2.2 温升

CPS 的温升包括接线端子的温升、易近部件的温升、主电路温升、控制电路的温升、线圈和电磁铁绕组的温升、辅助电路的温升和其他部件的温升等。各部件规定的温升极限值见表 2.12-2~表 2.12-5。

表 2.12-2 接线端子的温升极限值

接线端子材料	温升极限值 ^① (K)
裸铜	60
裸黄铜	65

续表

接线端子材料	温升极限值 ^① (K)
镀锡的铜或黄铜	65
镀银或镍的铜或黄铜	70 ^②
其他金属	③

①规定的温升极限值适用于新试品，而对于试后温升验证的极限值可增高 10K。

②接线端子温升极限值 70K 是以连接 PVC 电缆为依据的。当实际使用中采用的连接导体或电缆截面积显著小于试验要求的截面积时，将导致接线端子和内部部件的温度升高，较高的温度有害于电器，未征得制造厂同意不应采用这类导体。

③温升极限值是根据使用经验或寿命试验确定的，但不应超过 65K。

表 2.12-3 易近部件的温升极限值

部件名称 ^①	温升极限值 ^② (K)
手操作部件	
金属的	15
非金属的	25
可触及但不可握持的部件	
金属的	30
非金属的	40
正常操作时不触及的部件	
金属的	40
非金属的	50

①除所列部件之外不规定其值，但不应引起相邻绝缘材料部件的损害。

②规定的温升极限值适用于新试品。

表 2.12-4 绝缘线圈在空气中的温升极限值

绝缘材料耐热等级	温升极限（电阻法测量） (K)
A	85
E	100
B	110
F	135
H	160

注 绝缘材料的耐热等级划分见 GB/T 11021—2007《电气绝缘耐热性分级》规定。

表 2.12-5 断续工作制试验循环数据

CPS 断续工作制的级别	每一次闭合—断开操作循环时间 (s)	控制线圈电源保持通电时间
1	3600	通电的时间应与制造厂规定的负载因数相一致
3	1200	
12	300	
30	120	
120	30	
300	12	
1200	3	

3.2.2.3 介电性能

CPS 在其安装环境条件下应满足绝缘配合的要求，CPS 应能耐受如下电压：采用过电压类别确定额定冲击耐受电压、适用于隔离电器触头间的冲击耐受电压、工频耐受电压。

电气间隙的设计应使 CPS 有足够的承受能力来承受额定冲击耐受电压。

续表

使用类别	I_c/I_e	U_r/U_e	$\cos\varphi^{④}$	操作循环次数	
				通 电	不通电
			$L/R^{⑤}$ (ms)		
DC-40	1.0	1.05	2.5	3000 ^③	4000
DC-41	1.0	1.05	1.0	6000 ^③	4000
DC-43	2.5	1.05	2.5	6000 ^③	4000
DC-45	2.5	1.05	15.0	6000 ^③	4000
DC-46	1.0 ^②	1.05	②	6000 ^③	4000

① $I_e \leq 100\text{A}$, $\cos\varphi=0.45$; $I_e > 100\text{A}$, $\cos\varphi=0.35$ 。
② 试验用白炽灯作为负载。
③ 用一种极性操作一半,反极性操作一半。
④ $\cos\varphi$ 的允许误差: ± 0.05 。
⑤ L/R 的允许误差: $\pm 15\%$ 。

2) I_r 和 I_{cr} 、 I_{cs} 短路试验前和试验后的操作性能。在进行 I_r 和 I_{cr} 、 I_{cs} 短路试验前和试验后, CPS 按表 2.12-9 中相应使用类别所规定的条件及规定的操作循环次数, 应能接通和分断电流而无故障。 I_{cs} 短路试验后的前 25 次操作循环应使控制电路先通电、用就地人力操作装置(如有的话)进行, 就地人力操作装置可以就地直接或远距离驱动(例如: 手柄、电动机驱动、螺旋管等)。除上述 25 次以外的其余操作循环, 通电时间规定为 0.05s, 只要触头再断开之前已经完全闭合到底, 则允许小于 0.05s。除使用类别 AC-

45b 和 DC-46 的间隔时间为 60s 外, 其余间隔时间不应超过表 2.12-7 规定的值。
3) 约定机械操作性能。除上述 1) 项要求的电气操作性能之外, CPS 的机械闭合—断开操作循环次数应能满足表 2.12-8 中相应不通电时的要求。
若 CPS 可配备欠电压和/或分励脱扣器, 则每一个脱扣器的闭合—脱扣操作应占操作循环总次数的 10%, 试验开始时和试验结束前各进行 5%。

表 2.12-9 I_r 和 I_{cr} 、 I_{cs} 短路试验前和试验后的操作性能相应使用类别的接通和分断条件

使用类别	额定工作 电流	接 通			分 断			试前、试后作循环次数	
		I/I_e	U/U_e	$\cos\varphi^{②}$	I_c/I_e	U_r/U_e	$\cos\varphi^{②}$	I_r 和 I_{cr}	I_{cs}
AC-40	所有值	1	1	0.8	1	1	0.8	1500	750
AC-41	所有值	1	1	0.95	1	1	0.95	3000	1500
AC-42	所有值	2.5	1	0.65	2.5	1	0.65	3000	1500
AC-43	$I_e \leq 17\text{A}$	6	1	0.65	1	0.17	0.65	3000	1500
	$I_e > 17\text{A}$	6	1	0.35	1	0.17	0.35	3000	1500
AC-44	$I_e \leq 17\text{A}$	6	1	0.65	6	1	0.65	3000	1500
	$I_e > 17\text{A}$	6	1	0.35	6	1	0.35	3000	1500
AC-45a	所有值	2	1	0.45	2	1	0.45	3000	1500
AC-45b	所有值	1 ^①	1	①	1 ^①	1	①	3000	1500
				$L/R^{③}$ (ms)			$L/R^{③}$ (ms)		
DC-40	所有值	1	1	1	1	1	1	1500	750
DC-41	所有值	1	1	1	1	1	1	3000	1500
DC-43	所有值	2.5	1	2	2.5	1	2	3000	1500
DC-45	所有值	2.5	1	7.5	2.5	1	7.5	3000	1500
DC-46	所有值	1	1	①	1	1	①	3000	1500

① 试验用白炽灯作为负载。
② $\cos\varphi$ 的允许误差: ± 0.05 。
③ L/R 的允许误差: $\pm 15\%$ 。

(3) 寿命。

1) 机械寿命。按照惯例, 一种型式的 CPS 的机械寿命定义为有 90% 的这种型式的电器在需要进行维修或更换机械零件前, 所能达到或超过的无载操作循环次数。无载操作循环次数的优先数(用百万次表示)为: 0.001, 0.003, 0.01, 0.03, 0.1, 0.3, 1, 3, 10。

CPS 机械寿命的验证作为特殊试验由制造厂自行处理。可采用的方法为单 8 制试验或双 3 制试验。

2) 电寿命。按照惯例, CPS 的电寿命以表 2.12-9 中所列相应使用类别下不需维修或更换零件的有载操作循环次数来表示。

制造厂可规定按下述条件所能达到的电寿命: ①在正常

负载和过载条件下; ②在短路后 (I_{cs} 的 O-t-CO-t-rCO 操作之后)。

CPS 电寿命的验证作为特殊试验由制造厂自行处理。

3.2.2.5 接通、承载和分断短路电流的能力

CPS 应能够承受短路电流所引的热效应、电动力效应和电场强度效应。

短路电流可能会在接通、闭合位置和分断电流时发生。

(1) CPS 接通、承载和分断短路电流的能力用下述额定值来表示:

- 1) 约定分断能力。见表 2.12-10 所列的预期约定试验电流 I_{cr} 和 I_r 。
- 2) 额定运行短路分断能力 I_{cs} 。

表 2.12-10 与给定结构的最大 I_e 相应的
预期约定试验电流 I_{cr}

给定结构的最大 I_e (A)	I_{cr}/I_{emax}	I_{crmin} (kA)
0~32	30	0.2
33~63	25	1
64~250	20	1.6
251~630	15	5

(2) 如果瞬时脱扣器的瞬时最大脱扣电流值的 80% 大于表 2.12-6 中相应的 I_c/I_e 值, 则应按此 80% 电流值进行 3 次附加的分断操作。

短路分断能力要求 CPS 在与试验电压相应的工频恢复电压下, 能够分断直至等于与额定能力相应的所有电流值。

I_{cs} 操作程序为: O-t-CO-t-rCO。

I_{cr} 操作程序为: O-t-CO-t-CO-t-O-t-rCO-t-rCO。

其中: O 为一次分断操作; CO 为当控制电路预先通电时, 一次人力接通操作, 紧接着一次分断操作。无人力操作装置时, 这一操作程序由 rCO 代替; rCO 为一次接通操作, 紧接着一次分断操作; t 为试验间隔时间。

3.2.2.6 通断操作过电压

制造厂应规定由 CPS 操作引起的通断过电压最大值。该值应不超过额定冲击耐受电压 (U_{imp})。

3.2.2.7 电磁兼容性 (EMC)

CPS 的电磁兼容性 (EMC) 应考虑在下述两种电磁环境条件中使用, 它们是:

(1) 环境 A。主要与低压非公用电网或工业电网场所/建筑有关, 本环境包括有较高的骚扰源 (符合 GB 4824—2004《工业科学和医疗 (ISM) 射频设备电磁骚扰特性限值和测量方法》中电器等级 A)。

(2) 环境 B。主要与低压公用电网有关, 例如: 民用、商用、轻工业场所/建筑和 (或) 相应的使用环境。本环境不包括有较高骚扰源的场合, 例如: 弧焊机 (符合 GB 4824 中电器等级 B)。

在正常使用条件下, 无电子线路的 CPS 电器不需要进行抗扰性试验和发射验证试验。

具有电子线路的 CPS 电器受电磁骚扰影响比较明显, 对这类电器应采用以下规定的试验来验证:

- (1) 抗扰性试验。
 - 1) 静电放电抗扰性试验。
 - 2) 射频电磁场辐射抗扰性试验。
 - 3) 电快速瞬变/快速抗扰性试验。
 - 4) 浪涌抗扰性试验。
 - 5) 射频场感应的传导骚扰抗扰度试验。
 - 6) 谐波试验。
 - 7) 电流骤降和短时中断抗扰度试验。
- (2) 发射试验。
 - 1) 传导射频发射试验。
 - 2) 辐射射频发射试验。

3.3 派生功能与特殊用途

3.3.1 带隔离功能的 CPS

隔离开关和隔离器主要用于配电电路和电动机电路中电源的隔离, 派生隔离功能的 CPS 同样也可用于配电电路和电动机电路中电源的隔离, 即在集成断路器 (熔断器)、接触器、过载 (或过电流) 保护继电器、欠电压保护继电器功能的基础上又集成了隔离器的功能, 其有关隔离的性能应满

足隔离器的要求 (符合标准 GB 14048.3)。

现有集成化的 CPS 产品主电路派生隔离功能有两种实现方式:

(1) 隔离功能触头内置于 CPS 产品内部, 各极隔离触头与主触头串联。分断电路时主电路触头先分断, 隔离用触头后分断; 接通电路时主电路隔离用触头先接通, 主电路触头后接通, 即隔离触头不分断电流 (即使用类别 AC-20), 仅用于隔离。面板显示则有一个专门的用于指示产品处于隔离的指示位置 [见图 2.12-9 (b)]。代表产品为隔离型的 KB0-G 系列产品, 其电气原理图如图 2.12-3 (b) 所示。

(2) 在产品电源端安装专用的隔离功能模块。隔离功能模块与产品本体的主电路接线端子直接插接, 各极隔离触头与主触头串联。隔离模块具有独立的操动机构, 其与产品主体的关系类似于隔离器与其他产品串联连接使用在系统中的情况。处于隔离位置时主体的面板不指示, 需通过观察隔离模块的手柄位置得知。代表产品为带隔离功能模块的 TeSys U 系列产品, 其电气原理图如图 2.12-3 (d) 所示。

KB0 系列的 CPS 产品选配控制回路的隔离模块还可实现控制回路的隔离功能。当手柄位于隔离指示位置时, 主电路隔离触头处于隔离位置, 同时机构也带动控制回路的隔离模块处于隔离位置, 可实现控制回路的隔离功能。

3.3.2 带可逆 (双向) 控制功能的 CPS

当电动机运转时反接电动机的定子接线, 可使得电动机反向运转, 实现电动机的可逆控制; 当电动机停止转动后反接电动机的定子接线, 可使得电动机反向运转, 实现电动机的双向控制。依此原理, 可采用两种方式实现该功能:

(1) 采用两台产品并联并辅以机械联锁和电气联锁, 在负载端反接线路, 通过对电磁系统的控制实现反接电动机的电子接线, 如图 2.12-16 (a), 按此方案实现可逆 (双向)

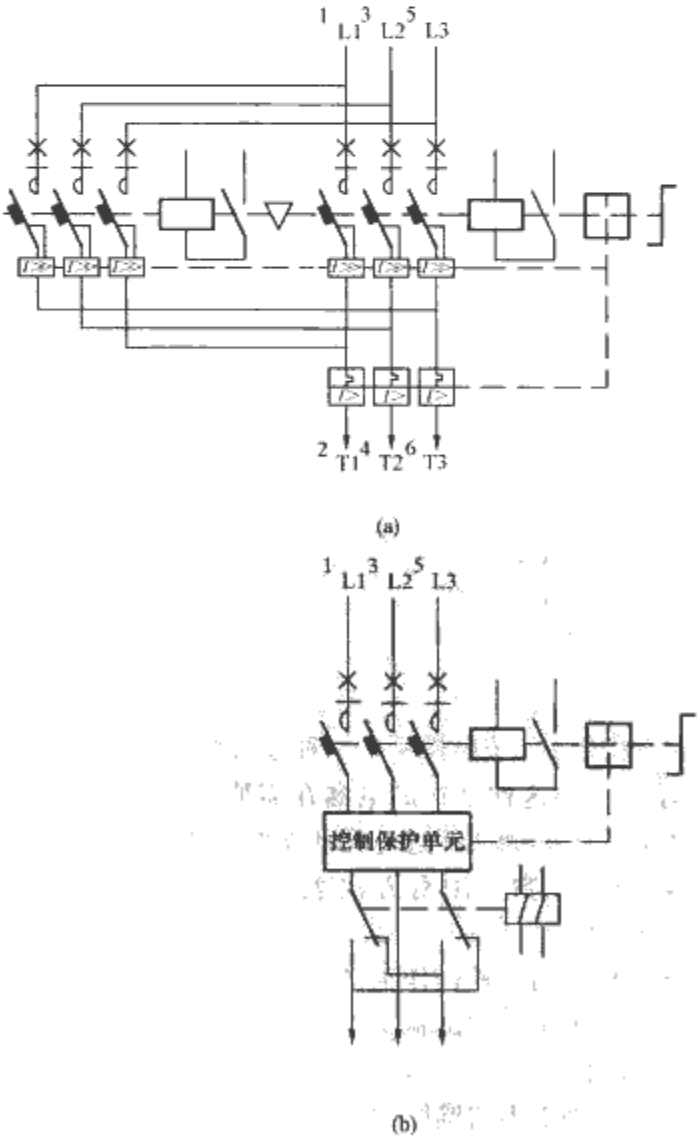


图 2.12-16 可逆控制功能的电气原理图
(a) 带可逆控制功能的 KB0N; (b) 带可逆控制功能的 TeSys U

控制功能的代表产品为可逆型的 KB0N 系列产品。

(2) 在负载端增加可逆控制模块，在可逆控制模块中通过双稳态电磁系统对三相电源进行换向，如图 2.12-16 (b) 所示。按此方案实现可逆（双向）控制功能的代表产品为可逆型的 TeSys U 系列产品。TeSys U 产品的可逆模块中没有灭弧装置（需要在模块和主体之间设置电气联锁，以确保可逆模块的触头“先通后断”），即可逆模块不用于分断电流，其先于主电路触头接通并晚于主电路触头分断，该时序通过程序控制。

上述两种方案各有优缺点，方案（1）的产品体积较大；方案（2）的产品体积小，但由于每次均由主电路触头分断大电流，其电气寿命和机械寿命从理论上分析会大幅度降低。

3.3.3 CPS 派生双电源转换功能

在重要负荷的电控系统中，往往需要使用双电源转换开关（ATSE）实现双电源供电。ATSE 可以基于塑壳断路器（MCCB）、接触器（CTT）、隔离开关等组合或重新

设计后构成，即 ATSE 可由多种方式构成而实现多种不同型式的产品。基于多功能的 CPS 产品，同样可以实现 ATSE。

以 KB0 系列 CPS 为例，采用两台 KB0 基本型产品辅以机械联锁、电气联锁以及电压检测装置可以构成 KB0S 系列 ATSE，如图 2.12-17 所示。由于 CPS 产品本身具有完善的保护特性包括短路保护性能，因此由 CPS 构成的 ATSE 属于 CB 级产品，也可以根据需要构成 PC 级产品（如不安装限流式快速短路脱扣器）。

3.3.4 基于 CPS 的减压起动控制

对于电动机起动，在无法采用直接起动的条件下，可以考虑采用减压起动或软起动。基于 CPS 可构成多种减压起动器，以 KB0 系列 CPS 为例，以 KB0 基本型产品为主开关，与适当的接触器、时间继电器、机械联锁和电气联锁可构成星—三角减压起动器 KB0J、自耦减压起动器 KB0Z、电阻减压起动器 KB0R，实现电动机的减压起动和多种保护，分别如图 2.12-18~图 2.12-20 所示。

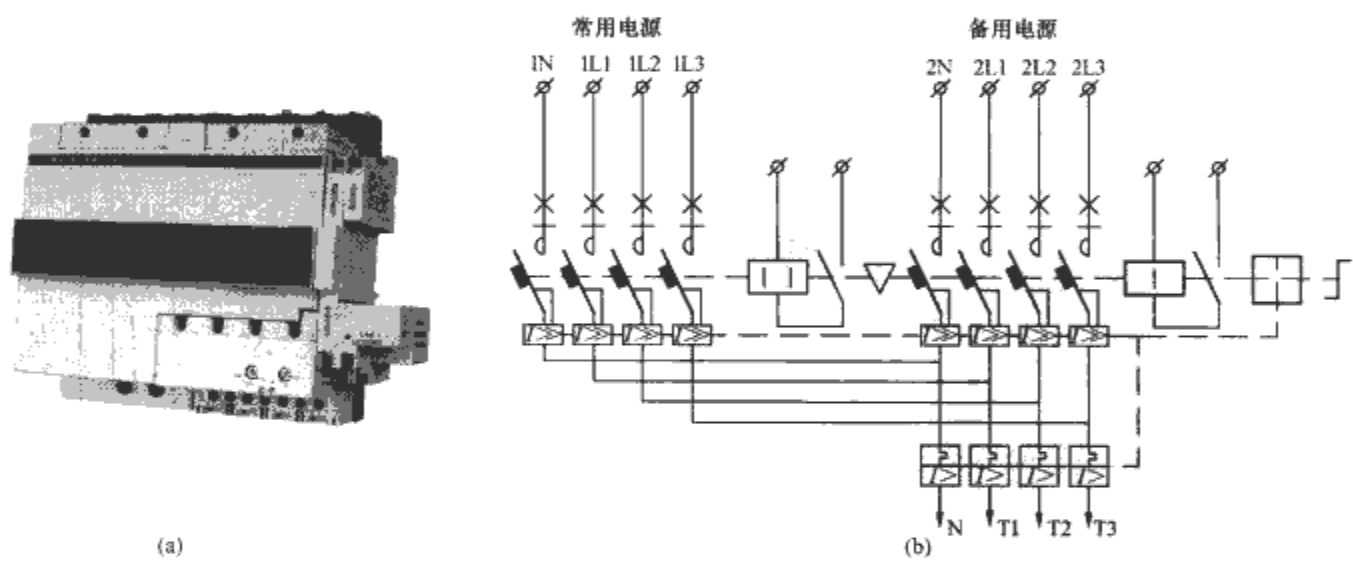


图 2.12-17 KB0S 双电源转换开关及其电气原理图
(a) 外观图；(b) 电气原理图

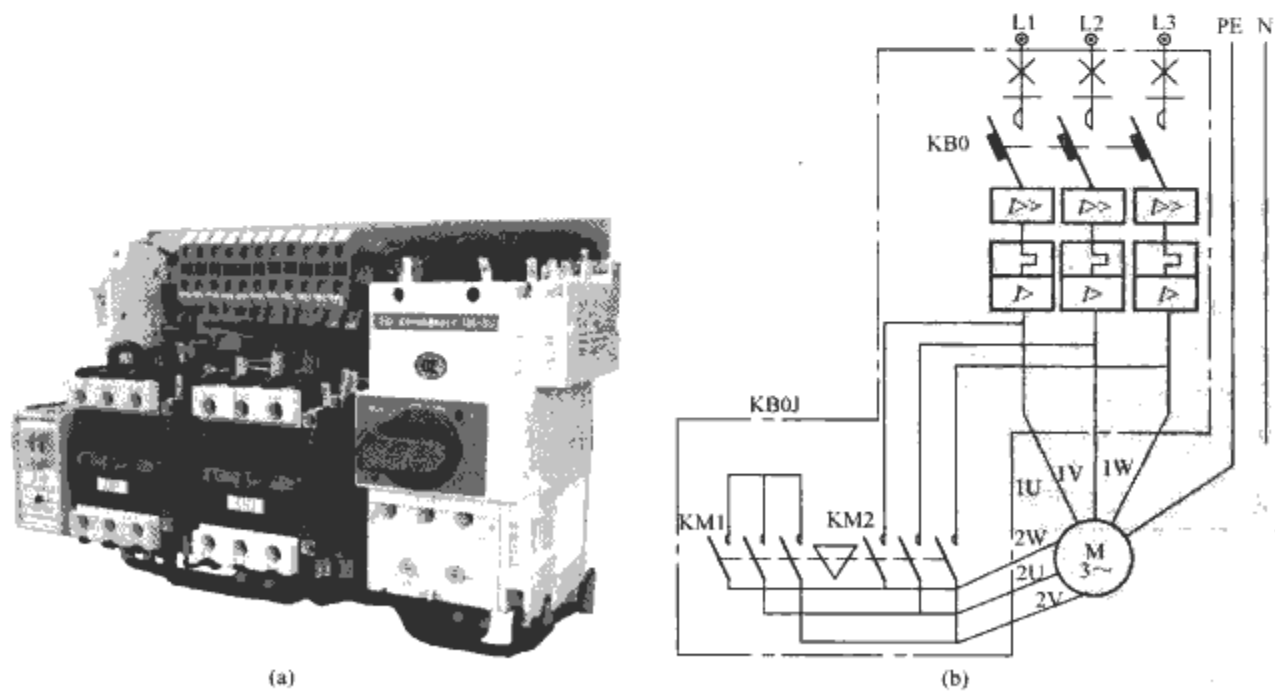


图 2.12-18 KB0J 系列星—三角减压起动器及其电气原理图
(a) 外形图；(b) 电气原理图

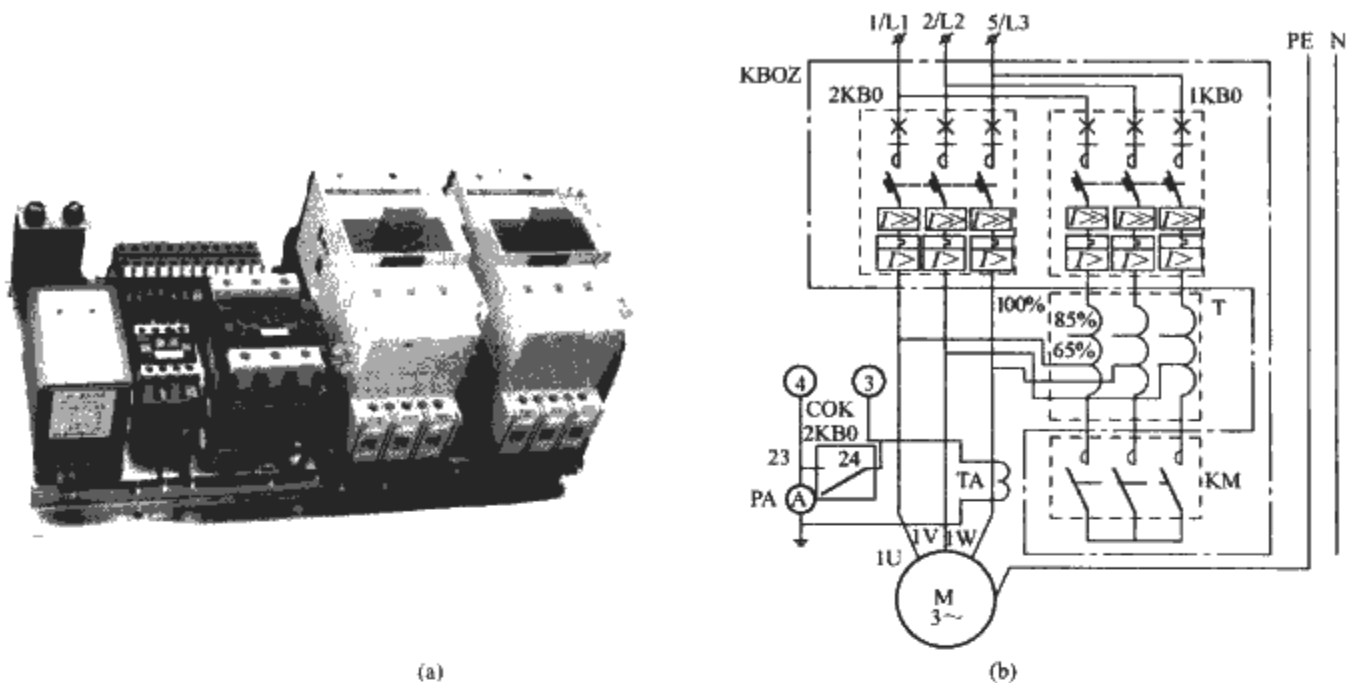


图 2.12-19 KBOZ 系列自耦减压起动器及其电气原理图
(a) 外观图；(b) 电气原理图

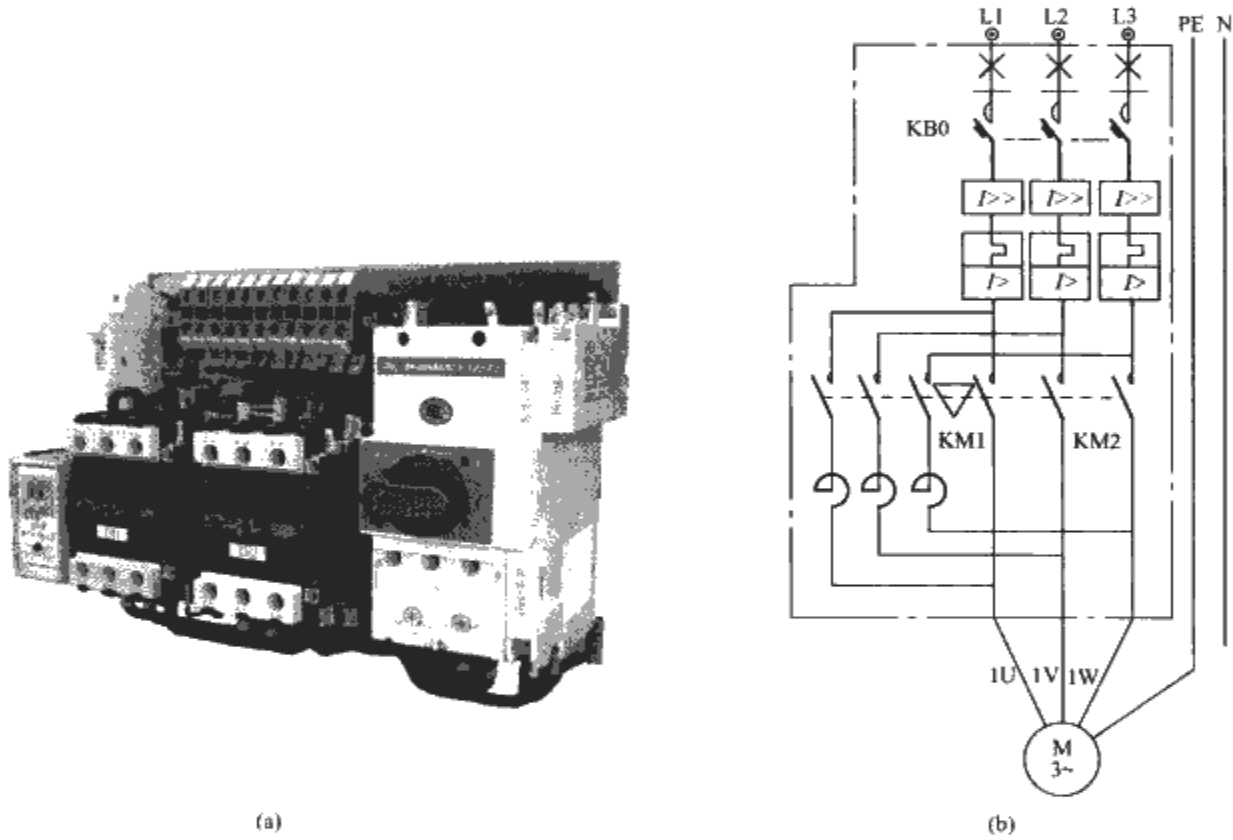


图 2.12-20 KBO R 电阻减压起动器及其电气原理图
(a) 外观图；(b) 电气原理图

3.3.5 基于 CPS 的双速控制器

许多场合需要使用双速电动机，例如带动风机负载的重要场合，通常需要两种风机转速分别用于正常和紧急情况（如发生火灾需高速排烟），为此需要采用双速控制器去控制两种转速的电动机。如图 2.12-21 所示为可用于控制一个绕组、两种转速电动机的 KBO D 系列双速控制器，表 2.12-11 所列为双速电动机绕组在两种转速下的连接方式。

表 2.12-11 双速电动机绕组在两种转速下的连接方式

	1KB0	2KB0	KM	绕组接法
低速运行	接通	断开	断开	

续表

	1KB0	2KB0	KM	绕组接法
高速运行	断开	接通	接通	

3.3.6 用于消防场合的 CPS

在许多重要用电场合如具有消防要求的场合，为了保证更重要的设备及人身安全，往往要求电动机在过载等故障条件下坚持工作，但应立即送出报警信号，在产品上实现“过载等故障仅报警不脱扣，短路故障脱扣断电”。

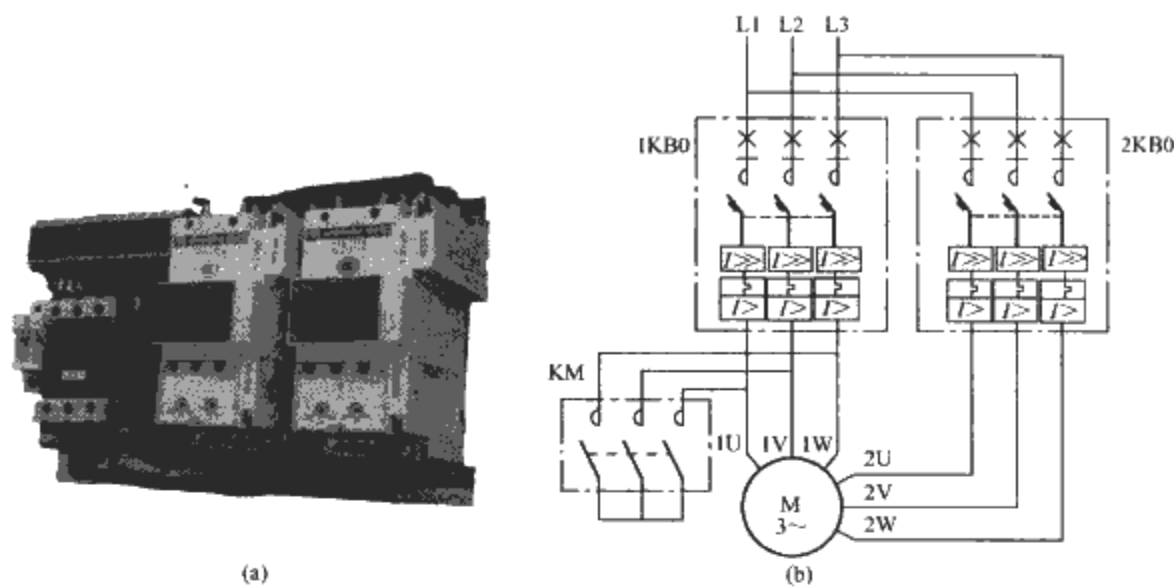


图 2.12-21 KB0D 系列双速控制器及其电气原理图
(a) 外观图；(b) 电气原理图

对于采用传统的双金属片和快速螺管电磁铁进行故障保护的 CPS（如 KB0），为满足上述功能（“过载仅报警不脱扣，短路脱扣”），必须设计两套独立的用于上述两大类故障的传动至操动机构的传动机构（或传动杆）。同时这两套传动机构（或传动杆）应分别以不同的方式带动操动机构以实现两种不同型式的动作，即过载报警传动机构（或传动杆）仅带动操动机构传动至报警输出而不带动主电路触头动作，而短路故障传动机构（或传动杆）既带动操动机构传动至报警输出又带动主电路触头断开。

对于采用电子技术，通过电流互感器采样，MCU 发出指令控制脱扣电磁铁（磁通变换器）致使操动机构动作实现故障情况下产品脱扣断电的 CPS，很容易通过程序将故障的动作方式设定为脱扣或不脱扣。

3.4 典型产品的技术性能（国内外主要厂商控制与保护开关电器产品性能特点对照）

表 2.12-12、表 2.12-13 对比分析了前述两种国内外 CPS 典型产品的主要功能、参数、特性等。

表 2.12-12 国内外 CPS 典型产品基本性能对比分析		
国 别	法 国	中 国
公 司	施耐德	中 凯
产品型号	TeSys U 系列	KB0 系列
主电路极数	3	3、4
外形尺寸	1 种：3 极——宽度 45mm	2 种：3 极——宽度 66mm、90mm 4 极——宽度 85mm、118mm
主体框架最大电流规格 (A)	12、32	45、125
主电路额定绝缘电压 (V)	690	690
控制器（脱扣器）的型式	3 种：标准型、高级型、多功能型	3 种：热磁型、电子型、智能型
整定电流范围 (A)	0.15~32	0.16~100
机械性能	机械寿命：1500 万次 防护等级：前面板 IP40，其他 IP20 隔离位置可加锁 整定值可加铅封	机械寿命：500~1000 万次 防护等级：IP20 隔离位置可加锁
电气性能	额定运行短路分断能力：50kA (440V/60Hz) 总分断时间：2ms 带限流器时：130kA (440V/60Hz) 电寿命：3 万次 (440V/AC-44)	额定运行短路分断能力：50kA (380V/50Hz) 短路分断总时间：2~3ms 高分断型：80kA (380V/50Hz) 电寿命：2 万次 (380V/AC-44)
其他特点	可逆控制采用串联结构，仅需一组主体和一个可逆模块	派生多种组合电器成套装置

表 2.12-13 国内外 CPS 典型产品主要功能对比分析		
产 品 型 号	TeSys U 系列	KB0-T 系列
功能	保护功能	过载、过电流（堵转）、短路、不平衡（断相）、接地/漏电、过转矩（运行中堵塞）、启动超时、欠电压、过电压、相序保护等
	脱扣级别	多种可设定
	故障区分	有
	复位方式	就地、自动、远程
	设备保护	空载保护

功能	保护功能	过载、过电流（堵转）、短路、不平衡（断相）、接地/漏电、过转矩（运行中堵塞）、启动超时、欠电压、过电压、相序保护等
	脱扣级别	多种可设定
	故障区分	有
	复位方式	就地、自动、远程
	设备保护	欠电流、欠功率保护

续表

产 品 型 号	TeSys U 系列	KB0-T 系列
功 能	试验功能	有
	定值整定	各种保护参数均可整定
	保护方式	可选择分断或报警
	测量功能	电动机负载电流
	温度保护	无
	控制方式	直接起动、可逆起动
	双电源转换	无
	欠电压/失电重起动	无
	I/O 端口	最多 3 路输出, 1~2 路用于线圈控制电路
	模拟量输出	具有一路 4~20mA 或 0~10V 输出, 任选一种
	通信接口	并行或串行, 并行接口通过分线器连接用于 PLC 的 I/O; 串行接口符合 ModBus-RTU、AS-I, 通过转换接口可接 FIPI/O、Profibus-DP、DeviceNet
	编程与监控	内置、远程
	预报警功能	热过载、接地、断相故障预警、阈值可设定
	维护功能	具有前 5 次历史故障记录、信息查询, 以及维护预警等
	自诊断与状态指示	多种自诊断功能, 键盘或远程通信

4 设计要点

4.1 设计程序

CPS 的设计涉及很多关键技术, 主要包括: 总体结构选型, 操动机构、限流触头、灭弧系统、电磁系统、多功能保护系统的自配合, 系列化产品开发, 扩展智能模块, 附件设计和材料选用等。

根据 CPS 的定义, “CPS 可以是也可以不是由单一的电器组成, 但总被认为是一个整体 (或单元)。保护特性的协调配合可以是内在固有的, 也可以是遵照制造厂的规定经正确选取脱扣器而获得的”, 因此, 通常将 CPS 分为两大类: 独立结构形式 (一体化) 的 CPS 和分立器件组合形式 (分体式) 的 CPS。

可见, 分立器件组合形式 (分体式) CPS 的设计, 只要是遵照制造厂的规定经正确选取脱扣器获得保护特性的协调配合即可, 可视作为一种成套电器的选型设计。而独立结构形式 (一体化) CPS 的设计, 则是一种大类低压电器的设计。其基本设计内容包括以下几个方面:

- (1) 确定设计参数、性能指标。
- (2) 确定主要功能与辅助功能的要求。
- (3) 确定总体结构的设计方案, 即产品构成、工作原理框图 (平面即二维设计为主)。
- (4) 主要功能模块、零部件的结构设计 (立体即三维设计为主)、材料选型、工艺设计、试制与试验验证等。

4.2 独立结构形式 (一体化) CPS 的设计

4.2.1 总体结构选型

有三种基本形式: 以接触器为主体实现 CPS、以断路器

为主体实现 CPS、以接触器与断路器综合为一体实现 CPS。其中, 前两种为独立结构形式 (一体化) 的 CPS, 后一种不是由单一的电器组成, 而是拼装为一个整体 (或单元)。

4.2.2 操动机构

机构的型式与控制保护模块密切相关, 有四种基本形式:

(1) 一般故障保护是由电磁式控制保护模块构成的 CPS, 如图 2.12-22 所示, 代表产品为 KB0 系列 CPS。其中, 操动机构包括手动操作和自动操作两部分。手动操作部分主要用于接受人为的通断控制, 操作一对与外接控制电源串联的控制触头, 接受人为的控制信号而操作电磁系统并接通或分断 CPS 的主电路。自动操作部分用于故障脱扣, 一方面可接受一般故障检测单元的故障信号而分别实现一般场合的“报警、分断电路”的常规要求或消防场合的“仅报警

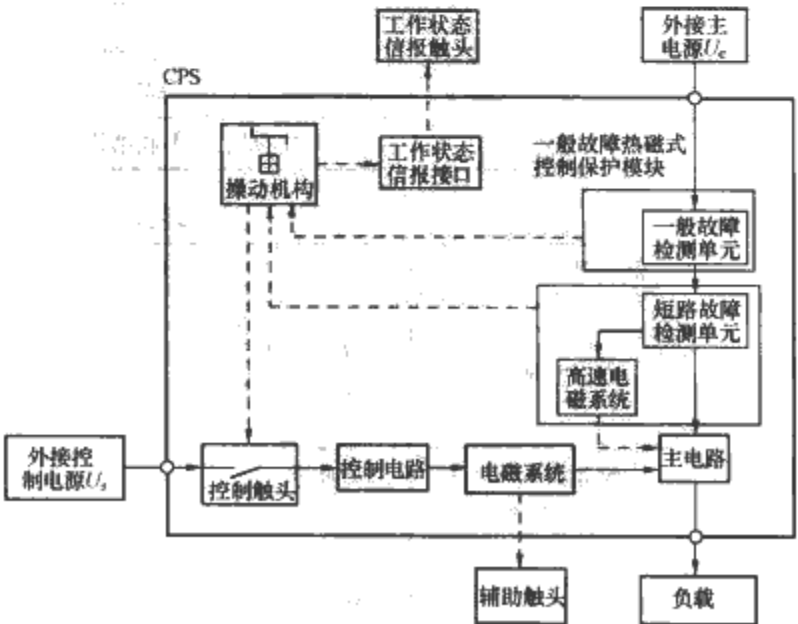


图 2.12-22 电磁式控制保护模块构成的 CPS

不短路电路”的特定要求；另一方面，这种 CPS 还同时带有独立的短路保护脱扣系统（由短路故障检测单元和高速电磁系统构成），操动机构的自动操作部分可接受短路保护脱扣系统的脱扣信号，实现短路保护的脱扣而分断电路。机构具有脱扣后的再扣功能。

(2) 一般故障保护是由电子式的控制保护模块构成的 CPS，如图 2.12-23 所示。代表产品为 KBO-T（智能型）系列 CPS。其中，操动机构的手动操作部分串联了一对控制触头（图 2.12-23 中的控制触头 1），接受人为的控制信号而操作电磁系统并接通或分断 CPS 的主电路。操动机构的自动操作部分即脱扣机构为带有独立的短路故障检测单元的保护脱扣系统作用于操动机构，实现脱扣、再扣功能。而一般故障的电子式控制保护模块不通过机械方式直接作用于脱扣机构，只是由其提供一组控制触头（图 2.12-23 中的控制触头 2）串联在控制电路中，实现一般场合的“报警、分断电路”的常规要求或消防场合的“仅报警不分断电路”的特定要求。

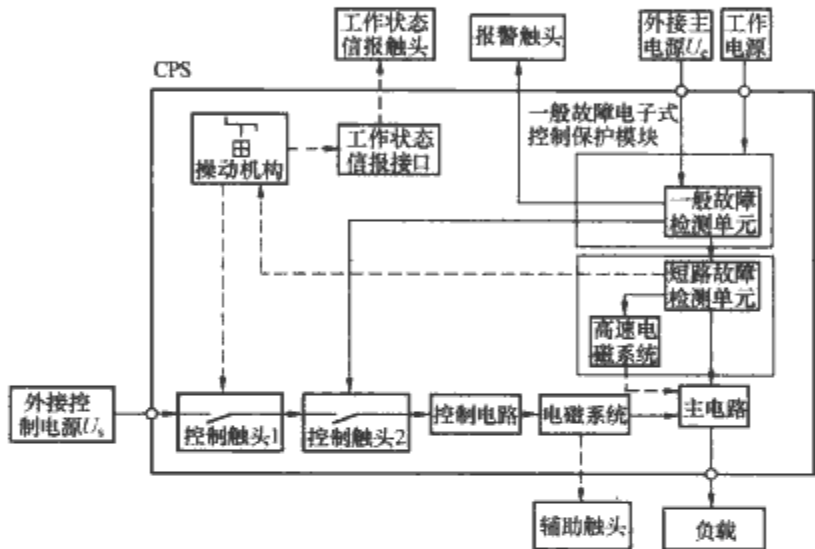


图 2.12-23 电子式的控制保护模块构成的 CPS

(3) 全功能电子式的控制保护模块构成的 CPS，如图 2.12-24 所示。代表产品为 TeSys U 系列 CPS 产品。其中，操动机构的手动操作部分串联了一对与控制保护模块供电电路（外接控制电源）相串联的控制触头，接受人为的控制信号而操作电磁系统并接通或分断 CPS 的主电路。操动机构的自动操作部分包括了脱扣机构。该电子式控制保护模块带有脱扣输出电路，可通过脱扣电磁铁（磁通变换器）直接作用于脱扣机构。脱扣机构可使操动机构中的储能连杆动作，直接分断主电路并同时分断控制电路。控制保护模块接受各种故障检测处理单元的故障处置信号，同时带有确保脱扣电磁铁可靠工作的自检功能，这种 CPS 可以不同时带有短路

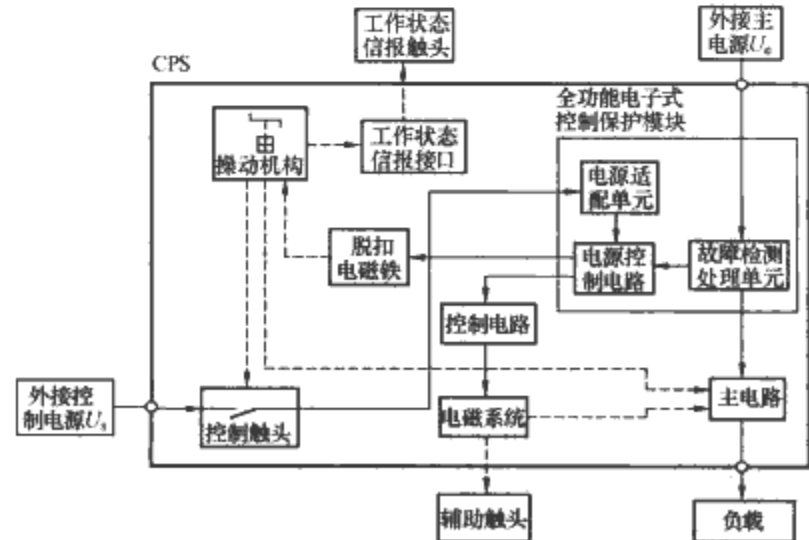


图 2.12-24 全功能电子式的控制保护模块构成的 CPS

保护脱扣系统。存在的不足：由于操动机构与控制触头联动的原因，没有可外接的输出端口，故障动作时，不能够实现消防场合的“仅报警不分断电路”的特定要求。

(4) 改进型的全功能电子式的控制保护模块构成的 CPS，如图 2.12-25 所示。代表产品为 VK60 系列 CPS 产品（研发中）。其中，操动机构的手动操作部分串联了一对与控制保护模块供电电路（外接控制电源）相串联的控制触头，接受人为的控制信号而操作电磁系统并接通或分断 CPS 的主电路。控制保护模块接受各种故障检测处理单元的故障处置信号。这种电子式控制保护模块构成的 CPS 也可以不同时带有短路保护脱扣系统。该电子式控制保护模块带有脱扣输出电路，可通过脱扣电磁铁（磁通变换器）直接作用于脱扣机构。脱扣机构可使操作机构中的储能连杆动作直接分断主电路并同时分断控制电路。如当短路故障出现时，可通过脱扣控制电路直接操作脱扣电磁铁，并使操动机构脱扣，同时分断主电路和控制电路。

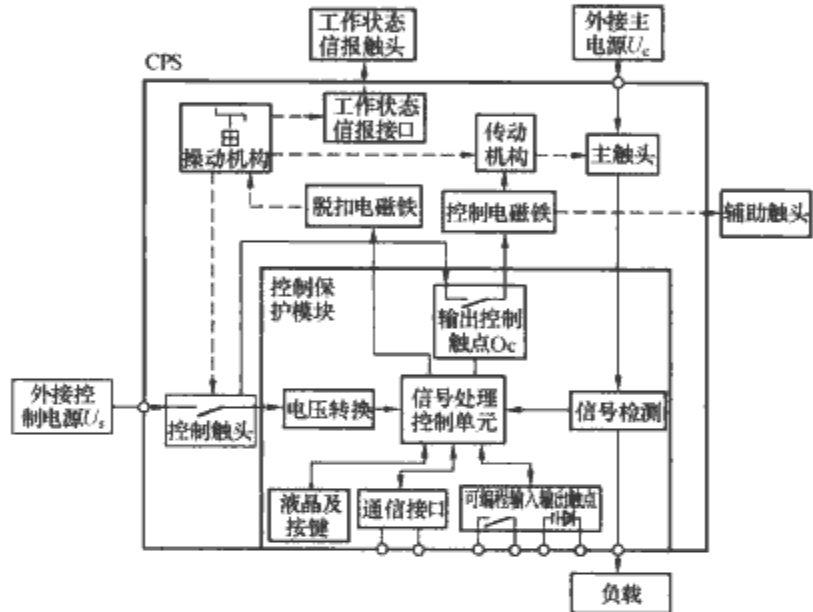


图 2.12-25 改进型的全功能电子式的控制保护模块构成的 CPS

同时，电路中带有另一个输出控制触头（Oc），用于实现设定的控制功能。输出控制触头（Oc）串联在控制电路内，接受控制保护模块的控制。如当一般的故障（包括过载、过电流、断相、漏电）出现时，根据需要，确定是否对输出控制触头（Oc）进行转换，从而实现对主电路的通断控制，包括实现一般场合的“报警、分断电路”的常规要求或消防场合的“仅报警不分断电路”的特定要求（此时，不脱扣）。

4.2.3 限流触头灭弧系统

触头灭弧系统是开关电器的执行部分。由于 CPS 将保护电器与控制电器的主要性能合而为一，同时具有较高的短路分断能力和较长的机械寿命、电寿命指标，材料、结构、设计参数等方面都是限流触头灭弧系统的关键，对 CPS 的分断能力和电寿命指标起到决定性的影响。典型的限流触头灭弧系统如图 2.12-10 主电路接触组所示。

触头系统一般采用双断点形式，其中，静触头导电板采用 U 形结构，分断电弧时产生的电动力为斥力，有利于快速熄灭电弧。触头压力的设计，主要考虑满足温升的条件下，以 20~50 倍的额定电流作为触头斥开的设计参考值。

限流技术是实现兼有高电寿命和高分断能力指标的关键技术之一，CPS 分断短路电流的过程可用图 2.12-26、图 2.12-27 和式 (2.12-1)、式 (2.12-2) 说明。

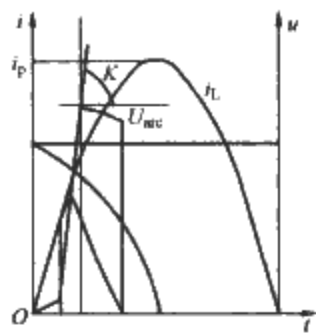


图 2.12-26 分断短路
电流的示意图

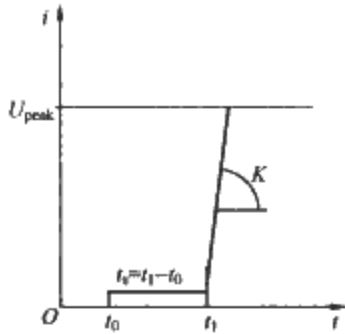


图 2.12-27 电弧
电压简化模型

$$U_e - U_{arc} = Ri_L + Ldi_L/dt \quad (2.12-1)$$

而电气系统额定交流电压为

$$U_e = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.12-2)$$

I_p 为预期短路电流峰值； U_e 为电源电压， U_m 为其峰值； U_{arc} 为触头分断时的电弧电压， U_{peak} 为其峰值； t_s 为电弧停滞时间，从触头分断时刻 t_0 到电弧电压曲线陡变时刻 t_1 的间隔时间 ($t_s = t_1 - t_0$)； K 为电弧电压曲线的陡变斜率，电弧从触头向灭弧栅片方向运动的结果； L 为总电感； R 为总电阻； $\int i_L^2 dt$ 为设备将承受的热能； $\int U_{arc} i_L dt$ 为分断时 CPS 内耗散的电弧能量。

通过分析图 2.12-26 及上述各式即可定性看出或运用计算机可定量确定出参数 t_s 、 K 、 U_{peak} 对被限制电流特性的影响。 U_{peak} 对被限制电流特性的影响： t_s 越小、 K 越大、 U_{peak} 越大，则限流作用越好。

为了减小 t_s 、增大 K ，高速电磁瞬动机构是关键之一，要求其能以很高的速度快速动作使触头迅速分断才能有显著的限流效果，否则在极小的空间条件下分断 50kA 或更高的预期短路电流是不可能的。

根据对限流分断电弧性能的试验研究结果表明，在不考虑诸如磁场对电弧和灭弧室内部压强的作用等因素时，单断点的触头分断速度在 6m/s 处是一个临界值。当触头分断速度小于 6m/s 时，停滞时间与预期短路电流、触头分断速度、触头材料密切相关；当触头分断速度大于 6m/s 时，触头材料、灭弧室侧壁间距、触头分断速度增长对停滞时间几乎无影响，也就是说，只要保证在出现短路电流时，触头分断速度达到了一定值，即可采用类似于接触器的触头灭弧系统，实现兼有高电寿命和高分断能力的指标。

4.2.4 电磁系统

电磁系统是接触器等电磁式开关电器的关键部件，CPS 产品中有多种电磁系统，其结构及参数的合理选择对产品动作的可靠性、分断能力、电寿命、机械寿命、功能的自配合及其经济指标都起着极为关键的作用。其中，对于瞬时脱扣用的电磁系统，要求其动作准确、速度要快，对于正常通断用的控制电磁系统，要求其动作特性配合合理、有极高的动作次数。其中，对于控制电磁系统可采用直动式，而脱扣电磁系统的电磁铁则可采用快速电磁机构，如磁通变换器、快速螺管电磁铁。

如图 2.12-28 所示为典型的用于脱扣的磁通变换器，如图 2.12-28 (a) 所示为电磁铁部分即磁轭与衔铁，如图 2.12-28 (b) 所示为磁轭的横截面，如图 2.12-28 (c) 所示为整个磁通变换器的爆炸图。电磁铁为由永久磁铁、电磁回路组成的复合电磁系统，其工作原理为永磁保持、直流电源产生释放动作。其中，在靠近永久磁铁的部位，由电工纯铁（或其他电磁材料）在结构上提供两个 L 形的弯脚 [见图

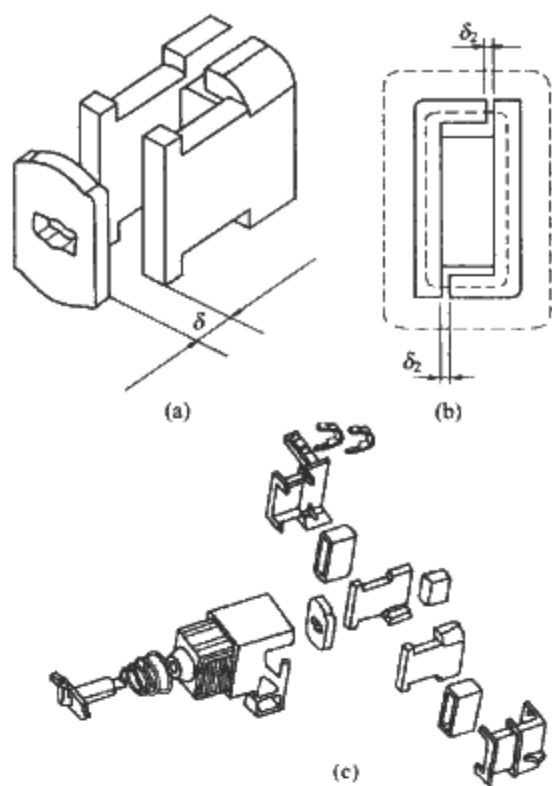


图 2.12-28 典型的用于脱扣的磁通变换器
(a) 磁轭与衔铁；(b) 磁轭的横截面；
(c) 磁通变换器的爆炸图

2.12-28 (b)]，同时提供两个极小的气隙 δ_2 ，形成磁通变换的二次通路，即永磁保持状态，气隙 δ 为零，吸力主要产生在气隙 δ 处，而当直流电压施加到线圈时，一旦动铁心释放，在气隙 δ 不再为零后，永久磁铁产生的磁通回路被两个 L 形弯脚处的磁路短接，即形成磁通路变换，加快了释放动作，提高了脱扣速度，可以满足故障特别是短路故障时的快速脱扣。

如图 2.12-29 所示为典型的直流控制电磁系统，如图 2.12-29 (a) 所示为该电磁系统的磁轭、衔铁和传动部分，如图 2.12-29 (b) 所示为整个电磁系统的爆炸图。

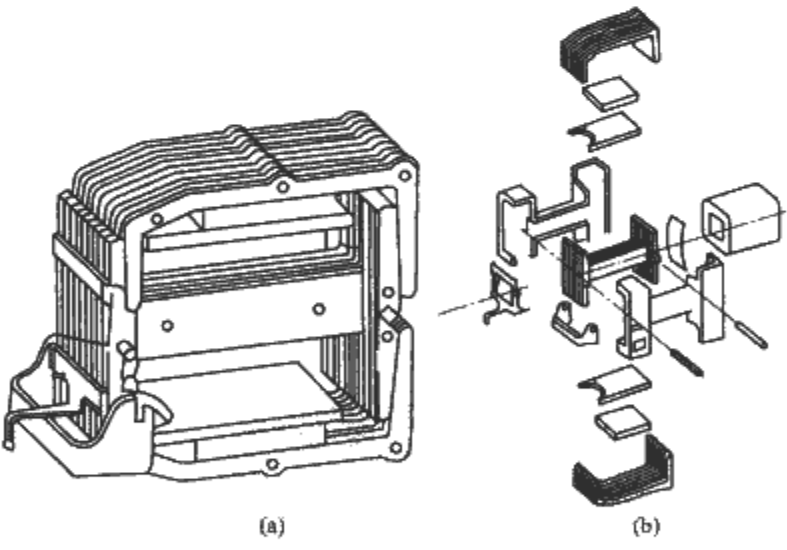


图 2.12-29 典型的直流控制电磁系统
(a) 磁轭、衔铁和传动部分；(b) 电磁系统爆炸图

4.2.5 多功能保护系统的自配合

多功能特别是三段保护系统中，除短路保护采用快速电磁机构外，还有过载保护的延时动作机构及电压等附加的保护机构，这些机构之间的配合决定了整个产品的自配合保护性能。如图 2.12-30 所示为典型产品的三段保护特性示意图。电控分支回路采用分立器件组合时，原有的 a、b、c 型与现有的 1、2 型选择性存在保护的协调配合问题，而 CPS 内部的自配合保护从根本上解决了电控分支回路的选择性保护问题。

其中，一般故障保护包括①段和②段，①段为反时限的热（过载）保护、②段为定时限的过电流保护。图中的③段为瞬时的短路保护。除了与过电流相关的三段保护外，CPS 还可根据具体的设计，实现堵转保护、断相保护、剩余电流保护、外部故障保护、温度保护和电压保护等多种多样的保护功能，如图中的④段为剩余电流保护。这些功能可分别通过热过载式保护器、电磁式过电流脱扣器、电磁瞬时短路脱扣器、电子式（包括模拟电路的和数字化的）脱扣器等不同型式的控制保护模块加以实现。其中，数字化的控制保护模块还可实现自检、多种参数设定、参数测量与显示、功能测试、通信等多种功能。

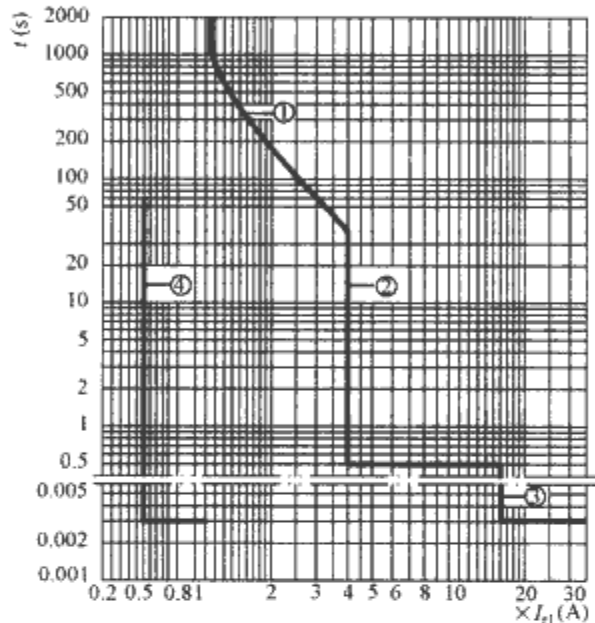


图 2.12-30 典型 CPS 产品的三段保护特性示意图

4.2.6 系列化产品开发

在保证实现较高的性能价格比的前提下，根据 CPS 产品具有的特点、应用情况，特别是用户的各种要求提供各种派生型产品及附件，以利于产品的市场推广和生产管理。由于 CPS 产品零部件较多，系列化产品设计中应特别注重通用性、标准化。

4.2.7 在智能型的 CPS 产品上实现扩展功能

智能型的 CPS，主要包括电流互感器、采样电路、微处理器（MCU）、电源部分、显示部分、通信部分等。在智能型的 CPS 产品上可实现更多、更复杂、更准确、更快速的控制和保护功能，可通过增选功能模块的方式实现不同应用需求的扩展功能。除了可实现基本的三段保护功能外，多种可扩展的功能包括：自检、附加保护功能（断相、三相电流不平衡、接地、漏电、起动超时、电动机起动时堵转、电动机运转中阻塞、欠载、欠电压、过电压、欠功率等）、多种电气参数设定、电气参数测量与显示、功能测试、故障记录与日志、可现场设定的控制功能、通信功能等。如图 2.12-31 所示为智能型 CPS 的控制保护模块构成与原理框图。

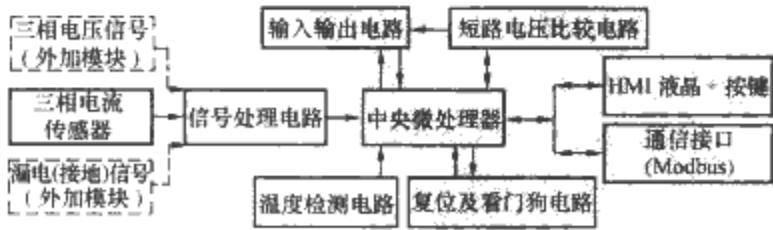


图 2.12-31 智能型 CPS 的控制保护模块构成与原理框图

4.2.8 附件设计

CPS 附件（辅助功能模块）的设计，包括辅助模块、信

号报警触头、欠电压保护器、分励脱扣器、远距离再扣器、漏电保护模块、可逆模块、隔离模块、限流模块等的设计，在结构设计上应采用模块化的结构。

4.2.9 材料的选择

CPS 特别注重小型化，因此材料的选取至关重要。重点选用的材料包括结构件、导电回路、触头等的材料。

5 选用与维护

5.1 CPS 的选用

通常，选用 CPS 的基本配置为主体+控制保护模块（又称过载脱扣器、智能控制器），可实现基本的控制与保护功能。根据需要，可选配各种附件实现附加的控制与保护功能，包括：辅助与信号报警触头、分励脱扣器、欠电压脱扣器、远距离再扣器、门或抽屉的面板操作机构、控制电路转换模块、浪涌吸收器等，可构成完整的控制与保护功能单元，在单一产品上实现协调配合的控制与保护功能。

选用单向的 CPS 基本型产品作为主开关，适用于分布式电动机的单向控制与保护、集中布置的配电控制与保护。

选用 CPS 作为主开关，与适当的接触器、时间继电器、机械联锁和电气联锁等附件组合，构成星—三角减压起动器、自耦减压起动器、电阻减压起动器等，适用于电动机的减压起动控制与保护。

选用 CPS 作为主开关，与适当的接触器、机械联锁和电气联锁等附件组合，构成双速、三速等多速控制器，适用于多速电动机的起动控制。

选用 CPS 作为主开关，安装在保护箱内，组成动力终端箱，适用于户外以及远程单独负载的控制与保护。

根据不同的需求，CPS 还可派生其他型式，如带隔离触头（隔离型）、板后接线型、插入式（型）等。

CPS 的安装比较灵活，特别是对于小容量产品，可在竖装、横装、平装场合的任意角度进行安装。

5.2 CPS 的适用范围与典型用途

（1）适用范围。在低压配电系统中，CPS 能够替代隔离器、断路器（熔断器）、接触器、热继电器、起动器等多种传统的分立元器件，作为分布式电动机的控制与保护、集中布置的配电控制与保护的主开关，通常可用于现代化建筑、冶金、煤矿、钢铁、石化、港口、铁路等领域的电动机控制与保护。而且特别适用于以下场合：

- 1) 电动机控制中心（MCC），较小的空间需要很多分支回路的场合。
- 2) 要求高分断能力的 MCC（如要求 I_{cu} 或 I_{cs} 达到 50kA 或更高的配电控制系统）。
- 3) 在靠近变压器出线端，对于较小容量的负载，选择断路器、接触器、保护器时，由于其极限分断能力有限，不能解决保护的安全与可靠性问题的场合。
- 4) 工厂或车间的单机控制与保护，如动力终端箱。
- 5) 智能化电控系统、应用现场总线的配电电控系统等。

（2）典型用途举例。CPS 作为低压电控系统的基础电器元件，特别是基于高性能微处理器的可通信、智能化产品的出现，为电控系统提供了高可靠性的高端产品。CPS 将直接起动、可逆控制、双速控制、星—三角减压、自耦减压、电阻减压、双电源转换等不同类型的电控产品采用一体化设计，为不同需求的用户提供了完整的智能化解决方案。

例如，对于生产线传送带的控制，可选择带 AS-i 总线

通信接口的控制器，构成基于现场总线技术的智能化可通信控制系统，大大提升生产设备的运行和保护性能。在水处理厂的群控或电动机控制中心（MCC）中，可选择带 Modbus 通信接口的控制器，构成基于现场总线技术的智能化可通信控制系统，实时监控水泵的运行，避免空转或欠载运行。如图 2.12-32 所示为 TeSys U 系列 CPS 产品在网络系统中应用的结构图。

5.3 维护

产品性能的优劣,不仅取决于产品本身的技术性能,而且与产品的使用维护是否符合要求有很大关系。做好产品的日常维护与定期检修工作,可以确保设备的正常运行。

5.3.1 日常维护与定期检修

CPS 的触头表面应保持清洁, 不允许涂油。铁心表面应保持清洁, 不得有杂物。

表 2.12-14

CPS 常见故障、诊断与处理方法

序号	故障现象	原因	处理方法
1	铁心吸不上或吸力不足	1. 电源电压过低或波动过大 2. 接线错误或发生断线 3. 控制触头接触不良 4. 线圈断线或烧毁, 动铁心被线圈骨架卡住, 机械可动部分被卡住等	1. 调节电源电压 2. 检查线圈两接线端电压、更换线路 3. 修理触头, 调节 4. 拆开安装盘, 更换线圈, 排除卡住故障
2	线圈过热或烧毁	1. 电源电压过高或过低 2. 线圈控制电压参数与实际使用条件不符 3. 交流铁心极面不平或中间气隙过大 4. 使用环境条件不良, 如空气潮湿, 含有腐蚀性气体或环境温度过高	1. 调整电源电压 2. 更换线圈, 符合使用条件下的电压值 3. 取出铁心, 消除极面的不平处或更换铁心 4. 排除空气湿度和腐蚀性气体, 调节环境温度
3	电磁铁 (交流) 噪声	1. 电源电压过低 2. 极面生锈或油垢、尘埃等进入铁心极面 3. 电磁系统歪斜后机械上卡住, 使铁心不能吸平 4. 短路环断裂 5. 铁心极面磨损过度而不平	1. 提高控制电压 2. 清理铁心极面 3. 排除机械卡住故障 4. 更换铁心 5. 更换铁心
4	双电源自动转换开关不能切换 (自投自复)	1. 常用电源或备用电源电压过低或波动过大 2. 电压继电器采电线未接到常用电源端或断线 3. 联锁用辅助触头不能正常通断或接触不良	1. 调节电源电压至要求值 2. 更换线路, 检查电压继电器应有信号指示 3. 拆下辅助触头模块清洗触头, 调整动触头形状, 使动静触头接触良好
5	双电源自动转换开关不停地转换	1. 用于电压监测的电压继电器采电线路相序接错 2. 控制回路中, 接线端子松动 3. 电磁机构内导电夹触头接触不良, 有尘埃	1. 对相序做相互调换 2. 紧固接线端子 3. 取下操作机构清理导电夹触点, 增大接触压力
6	起动电动机时 CPS 立即分断	1. 整定电流太小, 选择开关容量过小 2. 负载有短路故障	1. 增大整定电流或更换容量大的同类产品 2. 排除线路故障后再通电
7	CPS 闭合后, 过一定时间 (约 2h) 自行分断	1. 过电流脱扣器长延时整定值不对或选择开关容量过小 2. 控制保护模块与主体紧固螺钉松动, 接触不良 3. 出线端紧固导线松动	1. 增大整定电流或更换容量大的同类产品 2. 紧固螺钉 3. 紧固螺钉
8	操动手柄不能接通电源	1. 操动机构失灵 2. 控制触头接触失灵 3. 复位时间未到	1. 取下操动机构在活动部位涂润滑膏, 或更换机构 2. 清理或更换触头 3. 待复位时间到达后操作
9	主电路缺相或不通	1. 主触头动作机构失灵, 无触头压力 2. 触头弹簧失效 3. 触头烧毁 4. 控制保护模块与主体连接不良	1. 取出接触组进行修复, 调整超程压力 2. 取出接触组更换弹簧 3. 更换触头或接触组 4. 重新安装到位

5.3.2 常见故障、诊断与处理方法

CPS 常见故障、诊断与处理方法见表 2.12-14。

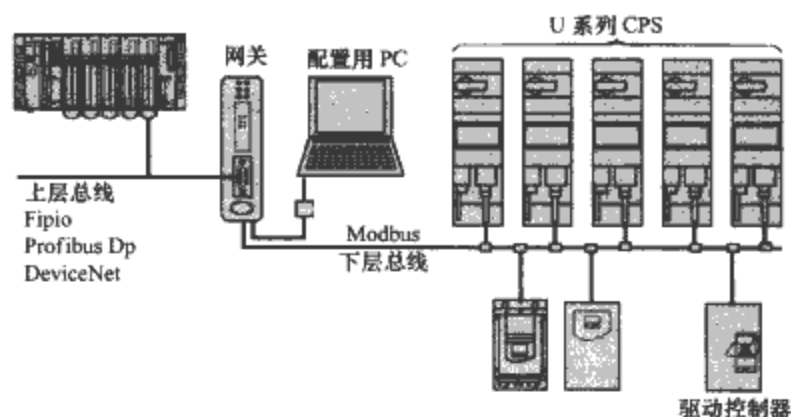


图 2.12-32 TeSys U 系列 CPS 产品在
网络系统中应用的结构图

续表

序号	故障现象	原因	处理方法
10	辅助触头发生故障	1. 辅助触头的动触桥卡死或脱落 2. 辅助触头支持件断裂 3. 辅助触头弹簧失效	1. 校正或重新装好触桥 2. 更换触头支持件 3. 更换弹簧
11	接线端温度过高	1. 接线端子螺钉未紧固 2. 螺钉滑牙	1. 拧紧螺钉至导线不松动 2. 更换螺钉，如导线夹滑牙，则应取出接触组，更换导线夹
12	CPS 不能再扣	1. 操动机构扣量过小 2. 复位时间未到	1. 更换操动机构 2. 待冷却后再扣
13	触头过热或时通时不通	1. 触头弹簧压力过小 2. 触头上有油污或表面高低不平，有金属粒凸起 3. 操作频率过高或工作电流过大 4. 触头的超程太小	1. 调高触头弹簧压力 2. 清理触头表面 3. 改用容量较大的 CPS 4. 调整超程或更换触头
14	星—三角等减压起动器不能正常转换	1. 起动按钮接触不良或动断按钮接触不良 2. 时间继电器电压线圈断线或接错 3. 线路接错或断线	1. 检查按钮中的触点接触情况 2. 检查继电器的线路 3. 恢复线路
15	不能自锁	自锁辅助触头的接触不良	调整自锁辅助触头接触压力和清理触头
16	手柄复位后也不能再扣合闸	热磁式控制保护模块中的机构失灵，不能复位再扣，而使主体的操动机构复位	对热磁式控制保护模块的机构进行修复，或更换模块

6 发展趋势

CPS 技术发展趋势是集控制、保护、监控、通信等功能于一体，具有集成化、模块化、小型化、高性能、简化系统设计、节能节材、安装调试方便等特点，其技术发展特征主要体现在以下几个方面：

6.1 保护功能更完善

除了常规的过载、过电流保护外，还可增加三相不平衡、堵转、阻塞、接地/漏电、过电压、电动机加速超时保护和相序等故障保护，还可通过热敏电阻检测，实现温度保护，并可通过欠电流、欠功率保护实现对相关设备的保护，且保护功能更准确。

6.2 定值整定功能更完善

除对于热保护和磁保护的电流整定值在一定范围内可调外，其余保护参数均可整定，包括各种保护功能报警和脱扣域值、脱扣级别（即可分别对应轻载和重载采取不同的保护曲线）、脱扣时间、脱扣后的复位时间、温度保护用热敏电阻的类型等，保护方式还可分别整定为脱扣（分断）或报警，增加了不同应用场合的灵活性。

6.3 可选欠电压/失电压重起动功能

“晃电”引起主电路断开后，可根据设定值实现电压恢复后的多种重起动方式。

6.4 测量功能

通过内置的测量和保护电流互感器，可测量三相电流、

漏电电流/接地电流、三相电压、频率、功率、功率因数以及电能等。

6.5 带多路通信接口

具有遥测、遥信、遥调、遥控即“四遥”功能，可与 ModBus、Profibus、DeviceNet 总线通信。

6.6 具有维护管理功能

具有历史故障记录、信息查询（如整定、故障、运行参数、操作次数、运行时间、故障时间、分断次数、热容量等）功能。

6.7 环保

触头、塑料等采用无公害的绿色环保材料。

6.8 节能

采用智能化的节能控制电路系统，线圈低功耗运行。

6.9 系列化

一方面，小规格产品趋向体积的小型化、模数化，如在 45mm 宽度尺寸内发展 32A 甚至更高电流规格的 CPS；另一方面，以小容量集成化的 CPS 产品作为主控制器，配以中、大容量的接触器或其他中、大容量开关电器，以此发展中、大容量的产品如 800A 甚至更高电流规格的 CPS。

第13章 终端电器

1 终端电器的概貌

终端电器是指装于电路末端的电器,用于对有关电路和用电设备进行配电、控制、保护、调节、报警等。其额定电压一般为220V、380V,额定电流一般为40A及以下,最大为125A。

模数化终端组合电器是指用于电力线路末端,由模数化电器以及它们之间的电气、机械(联)结和防护外壳等构成的结合体。组合电器的最大额定电流一般为250A。

终端电器使用面极广,遍及工业、商业和家庭,如高层建筑、住宅、车站、港口、医院和试验室等。

1.1 终端电器的特点

在设计终端电器时,从系统和成套角度出发,对各类电器作了全面的规划与考虑,其特点是:

(1) 安装轨道化。近年来,电器的安装问题已越来越多地受到制造厂和用户的重视。在最新的终端组合电器中,几乎都采用顶帽型安装轨,如图2.13-1所示。这样,制造厂能迅速地按用户要求,将开关电器方便地固定、拆卸、移动或重新排列,实现组合灵活化。

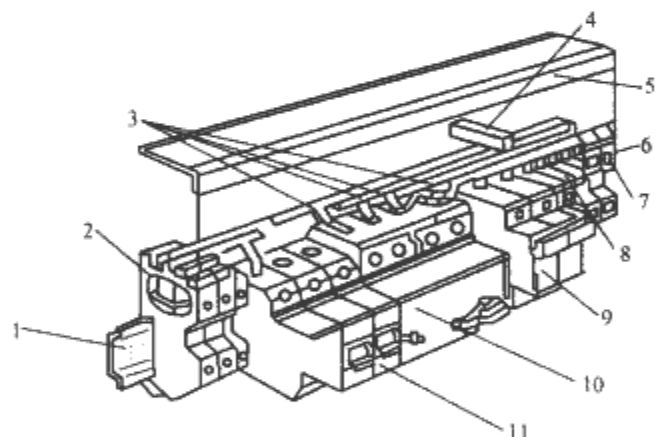


图 2.13-1 装有各种元件的
组合电器的内部结构

- 1—顶帽型安装轨；2—绝缘支座；3—母排；4—母排夹块；
5—母排遮盖；6—绝缘垫块；7—备用接线端支座；
8—接线端；9—熔断器式隔离器；
10—漏电开关；11—断路器

(2) 尺寸模数化。电器的宽度、高度、接线端的位置尺寸等,均统一在规定的尺寸系列上。其中,电器宽度(mm)常制成9的倍数,可为9,18,27,36等,即模数化电器的外形尺寸常常是能相互协调配合的。而接线端的高度常设计成处在同一水平上,这对装置的系列化和面板、母排的标准化设计带来极大好处。

(3) 功能多样化。终端电器已发展成特殊系列产品,除低压电器外,还有日用电器(如调光器、定时器、插座)和仪表(如电流表、电压表、计时器)等,均设计为轨道安装和模数化的外形尺寸,以便于拼装成多种用途的组合电器。

(4) 造型艺术化。与传统低压电器相比,外形造型美观大方,色调鲜艳明快。而组合电器常带透明罩盖。

(5) 使用安全化。终端电器常要求具有比IP20更高等级的防护外壳,以适合非熟练人员使用。而终端组合电器除了线路方案有触电、过载、短路、过电压等各种保护可供选择外,壳体内设有可靠的中性线和接地端子排,对于相线的进线与壳内配线排,均设有绝缘的保护遮盖。有的则设计成绝缘组合排,故特别适合于缺乏电气知识的非熟练人员使用。

1.2 系列品种与分类

终端电器大致的分类和每类的主要元件系列如下:

(1) 线路保护与开关类。

- 1) 主开关与隔离开关。
- 2) 熔断器式隔离器。
- 3) 开关熔断器组。
- 4) 圆筒形帽管式熔断体。
- 5) 小断路器。
- 6) 剩余电流动作保护电器(包括剩余电流动作保护器与剩余电流动作断路器)。

7) 电涌保护器,也称过电压保护器。

8) 插接器(插座)等。

(2) 控制电器类。

- 1) 接触器。
- 2) 时间继电器。
- 3) 电动机控制开关。
- 4) 控制按钮。
- 5) 开关(控制开关、选择开关和跷板开关)。
- 6) 遥控断路器。
- 7) 控制变压器。
- 8) 自保护固态继电器等。

(3) 楼宇自动化控制元件类。

- 1) 时间开关。
- 2) 时间编程器。
- 3) 定时器。
- 4) 光敏开关。
- 5) 调节器。
- 6) 空调保护器等。

(4) 信号、指示类。

- 1) 信号灯。
- 2) 绝缘检测器。
- 3) 漏电继电器。
- 4) 电压表和电流表。
- 5) 计数器、计时器。
- 6) 电铃、电笛、蜂鸣器等。

(5) 组合电器的防护外壳与结构附件。

1) 绝缘外壳。按防护等级IP与安装型式又分若干子类。

2) 金属外壳。按防护等级IP与安装型式不同而分类。

3) 安装轨。按材料分为钢、铝、塑料等。

4) 连接排。分单相、二相、三相加中性线等,并按长度不同分类。

5) 其他附件。如熔体备件盒、垫高块、标签纸等。

终端组合电器可按用户需要而有各种各样的组合,按其功能可分为三类。

(1) 具有保护线路或设备功能的组合电器。这种终端组合电器可具有过载、短路、漏电和电涌保护等功能,通常有进线总隔离开关,再经由各支路开关输出至各负载电路。终端组合电器特别适合在交流单相 220V、100A 以下非熟练人员使用。小型配电或多功能组合电器则适合在工业、商业交流 220V 或 380V、电流为 300A 以下的末端电路中使用。它们的组合方案如图 2.13-2 所示。

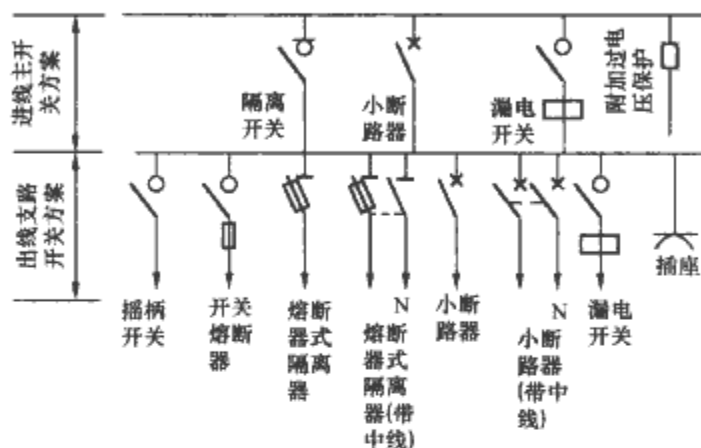


图 2.13-2 终端组合电器组合方案示意图

进线主开关可以从隔离开关、小断路器、剩余电流动作保护电器等中任择其一或二（混合式）组成,有时电源直接接至各出线支路开关（无电源总隔离开关）,有时还附加过电压保护,这些选择均由用户根据需要而定。但对于非熟练人员使用的终端组合电器,最常用的方案是以隔离开关或剩余电流动作保护电器总隔离,或以两者组合作为进线开关。电涌保护器主要用于负载回路有计算机、电视机或冰箱的电子电路中,以免瞬时过电压或网络电压漂移而损坏电器设备。

出线支路开关包括隔离开关（摇柄开关）、开关熔断器组、熔断器式隔离器、熔断器、小断路器、剩余电流动作保护器、过电压保护器、插座等。熔断器式隔离器在英国使用很普遍,它价格便宜、分断能力高,但遇到过载或短路后要更换熔体。在大量使用时,应选择有指示器的隔离器。小断路器在德国用得最广,它价格较贵、分断能力较低,但遇到过载或短路后能迅速重合闸使用。

(2) 具有控制功能的组合电器。这种组合电器可具有各种控制、信号、调节等功能,也可与上述线路或设备的保护元件相结合组成功能多样的组合电器。

控制装置常用元件有摇柄开关、转换开关、选择开关、按钮、信号灯、紧急电源、电压表、电流表、计时器、变压器、电铃、蜂鸣器等。

选择开关能与电压表或电流表配合测量回路参数。应急电源的功能为出现事故时能提供应急的备用电源,供 20lm（流明）低压灯照明 30min。变压器有安全变压器和电铃变压器两种,容量（VA）为 4, 8, 16, 40, 60, 二次电压（V）有 8, 12, 24 数种,与电铃或蜂鸣器等组合使用,以满足家庭、宾馆或医院服务台对低压电源的需要。

(3) 具有楼宇自动化功能的组合电器。涉及的主要有时间、光、温度、液位等参量的控制与管理,它既能使人舒适,又能节电和提高效率。

宾馆中旅客活动时间的安排、灯光的自动启闭、室温或水温的自动控制、楼梯灯的自动关闭、医院病人与护士或宾馆客人与服务台的联系等,均要求有各种功能的自动控制装

置。其中使用的电器有接触器、继电器、门继电器、定时器、时间继电器、电子机械式时间开关、数字式编程器、光敏开关、光敏程控器、恒温控制器、可变温度控制器和液位控制器等。

1.3 国外终端电器概况

最早采用轨道安装的是端子排。20 世纪 70 年代初出现了小容量轨道安装的低电压电器,如小容量交流接触器、中间继电器等。20 世纪 80 年代中,西欧各先进工业国家相继推出轨道宽度尺寸为 9mm 模数的终端电器与组合电器装置,其中欧洲的一些公司领导着终端电器与组合装置的发展新潮流,迄今达到了比较成熟和完善的水平。

(1) 产品遵循最新标准。服从的标准有:

1) IEC 60715—1995《低压开关和控制设备的尺寸与安装轨》。规定了电器产品直接夹紧在轨道上,如 TH 型（顶帽型）轨或 G 型轨,以及借助螺栓或钩型附件固装的 C 型轨,如图 2.13-3 所示。

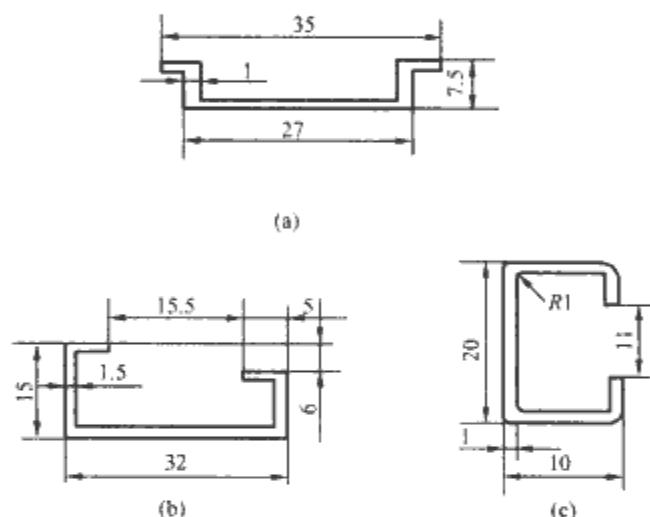


图 2.13-3 IEC 60715—1995 推荐的各种安装轨（单位：mm）
(a) TH 型（由称顶帽型）；(b) G 型；(c) C 型

2) 1978 年首次公布的 IEC/TR 60629—1978（家用和类似用途装置电器附件安装的）模数系统的标准活页。规定电器的宽度尺寸以 12.5mm 为模数；而欧共体则选择 9mm 为电器宽度尺寸的模数,他们认为电器设计、工艺、材料的发展已有条件设计的更小,从而在国际上形成了两个流派。

3) 1984 年修订的 BS 5486—13《终端组合电器的特殊要求》。详细规定了适合于非熟练人员使用的终端组合电器的线路方案、技术性能和各种安全要求等。标准中规定组合电器通常应具有进线隔离开关（主开关）,再经母线接至各支路开关,它可由熔断器式隔离器、小断路器、漏电开关组成,并由用户根据需要选用一种或数种。

(2) 终端电器专业厂发展迅速。随着各种基础标准的建立,各先进工业国家的制造厂相互联合,组成各种终端电器与装置的公司,配套满足用户多方面要求。例如,法国就有施耐德集团的梅兰日兰公司、海格公司、罗克朗公司等（其中罗克朗公司下设 25 个工厂,分别专业生产各种终端电器、日用开关电器和小型组合电器）;德国生产这类产品的有 SIEMENS 公司、ABB 公司、金钟默勒公司;意大利有 AVE 公司、Clem 公司;英国有 GEC 公司;比利时有 VYNCKIER 公司。总之,终端开关电器及其组合电器的生产工厂发展很快,竞争激烈。

(3) 成批生产,品种齐全,指标先进。如法国施耐德集团的梅兰日兰公司专设一个部生产这类电器,型号为 MULTI9。据称 2005 年产量已达 1 亿件以上,品种达 500

下面以 NB1 小型断路器产品为例进行说明。

(1) 用途。适用于交流 50Hz (60Hz)、额定工作电压 230/400V、额定工作电流至 63A 的线路中。主要用作线路的短路和过载保护，并可与漏电单元拼装成剩余电流动作断路器。此外，在正常情况下可作为对线路的不频繁操作转换之用。它适用于工业、商业、高层楼宇和民用住宅等多种场所。其外观如图 2.13-4 所示，产品主要技术参数见表 2.13-2。

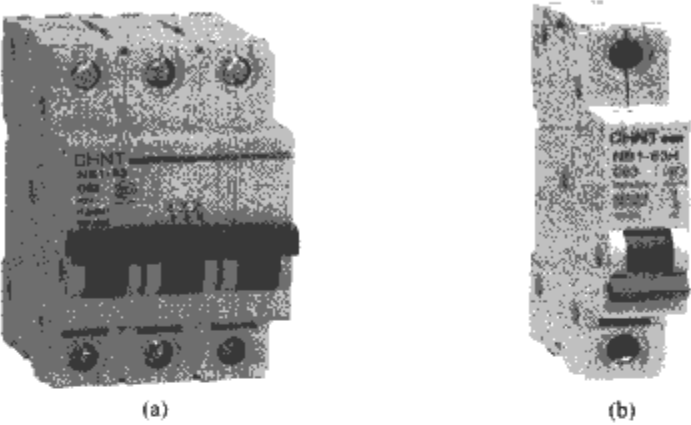


图 2.13-4 NB1 产品外观
(a) NB1-63; (b) NB1-63H

表 2.13-2 NB1 产品主要技术参数

产品型号	额定电流 (A)	极数	额定电压 (V)	额定短路分断能力 (kA)
NB1-63	1, 2, 3, 4, 6, 10, 16, 20, 25, 32,	1, 2, 3, 4	230/400, 400	6
NB1-63H	40, 50, 63			10

表 2.13-3 剩余电流动作断路器系列规格和主要参数

产品型号		NB1L-40 NB1L-63	NB1LE-40 NB1LE-63 NB47LE-63	NBH8L-40 NBH8LE-40	NL1-63 NL1E-63	DZ267LE-32	DZ47LE-32 DZ47LE-63	DZ158LE-100
项目								
额定电压(V)		230,400	230,400	230	230,400	230	230,400	230,400
额定电流(A)		1~40/50,63	6~40/6~63	1~40	25,40,63	6~32	6~32/6~60	63,80,100
分断能力(kA)		6		6(NBH8L-40)	6 (限制短路电流)	4.5	4.5(DZ47LE-32)	6
		10(H 型)		4.5(NBH8LE-40)			6(DZ47LE-63)	
额定剩余动作电流(A)		0.03,0.1,0.3		0.03	0.03,0.1,0.3	0.03	0.03,0.1,0.3	0.03,0.1,0.3
寿命	电气寿命(次)	2000			2000	2000	2000	1500
	机械寿命(次)	2000			2000	2000	2000	8500
极数		1P+N,2P,3P,3P+N,4P		1P+N	2P,4P	1P+N	1P+N,2P,3P,3P+N,4P	1P+N,2P,3P,3P+N,4P
脱扣特性		B,C,D		B,C		C	C,D	(8~12)I _N
剩余电流脱扣形式		电磁式	电子式	电磁式 电子式	电磁式 电子式	电子式	电子式	电子式
接线能力(mm ²)		10,16	10,16	10	16	6	6,16	35
应用场合		商业、住宅、工业		商业、住宅	商业、住宅、工业	商业、住宅	商业、住宅、工业	商业、工业
符合标准		GB 16917.1 IEC 61009-1			GB 16916.1 IEC 61008-1	GB 16917.1 IEC 61009-1		GB 14048.2 IEC 60947-2

注 1. IEC 61009-1:1996《家用和类似用途的带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCB0)第 1 部分：一般规则》。
2. IEC 61008-1:1996《家用和类似用途的不带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCCB)第 1 部分：一般规则》。
3. IEC 60947-2:1997《低压开关设备和控制设备 低压断路器》。

(2) 结构特点。

- 1) 额定短路分断能力高，全部额定电流等级可达到 6kA 和 10kA。
- 2) 双重接线功能，可方便地连接标准汇流排和软硬导线。
- 3) 接触防护组合型接线端子，安全性更高。
- 4) 储能式机构操作，触点快速闭合，克服了因人力操作手柄速度快慢不同带来的不利影响，大大提高了产品的使用寿命。
- 5) 附件多种配合形式，且模块化、弹性组合，用户安装非常方便。
- 6) I^2t 值低，达到欧洲标准能量等级 3 要求。
- 7) 具有隔离功能。
- 8) 绿色环保节能。

2.2 剩余电流动作断路器

剩余电流动作断路器系列规格以正泰产品为例，其主要参数见表 2.13-3。

下面以 NB1L 和 NB1LE 系列剩余电流动作断路器为代表进行说明。

(1) 用途。适用于交流 400V 及以下、频率为 50Hz (60Hz)、额定电流至 63A 的线路中。当人身触电或电网泄漏电流超过规定值时，剩余电流动作断路器能在极短的时间内迅速切断电源，保护人身及用电设备安全，同时可以保护线路和电动机的过载或短路，也可作为线路的不频繁转换及电动机的不频繁起动之用。

- (2) 结构特点。
- 1) NB1L-40 和 NB1LE-40 结构紧凑, 适合于家庭使用。NB1L-63 和 NB1LE-63 适合于商业和工业, 可具有漏电、过载、短路等保护功能。
- 2) NB1L 系列漏电保护为电磁式剩余电流动作断路器, 而 NB1LE 系列为电子式剩余电流动作断路器, 均具有高的可靠性和抗干扰性。
- 3) 额定短路分断能力可达 6kA, 对于 NB1L-40H 可达 10kA。
- 4) 储能式机构操作, 触点快速闭合, 克服了因人力操作手柄速度快慢不同带来的不利影响。
- 5) 试验回路动态控制, 不易烧毁试验电阻。
- 6) 绿色环保节能。
- (3) 产品外观如图 2.13-5 所示, 产品规格和主要技术参数见表 2.13-4。

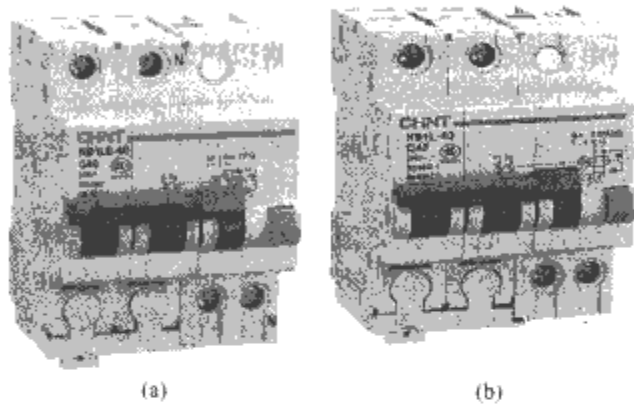


图 2.13-5 NB1LE、NB1L 产品外观
(a) NB1LE-40; (b) NB1L-40

表 2.13-5		HG30 主要技术参数						
额定工作 电流 (A)	额定工作 电压 (V)	额定熔断短路电流		机械操作性能 (次)	配用熔断 体型号	熔断体尺码 (mm×mm)	额定电流 (A)	
		电流 (有效值) (kA)	cosφ				熔断体	熔体
10	220	6	0.5	≥2000	RT30	8.5×23	10	10
16	220	6	0.5	≥2000	RT30	10.3×25.8	16	16
20	380	20	0.3	≥2000	RT30	8.5×31.5	20	20
32	380	20	0.3	≥2000	RT30	10.3×38	32	32
					RT14	10.3×38	32	2、4、6、(8)、10、(12)、 16、20、25、32
63	380	20	0.3	≥2000	RT30	16.7×35	63	63

4) 产品外观。HG30 产品外观如图 2.13-6 所示。

- (2) STK1-63 开关熔断器组。
- 1) 用途。适合于交流 50Hz, 额定工作电压 380V 及以下的配电电路中, 用来接通和分断正常负载与过载电流, 并具有线路过载和短路保护功能。产品符合 GB 14048.3。



图 2.13-6 HG30
产品外观

- 2) 结构特点。①由双断点桥式触头和熔断体两个主要部分组成。适装的熔断体为 D02; ②具有熔断体熔断指示功能。
- 3) 主要技术参数。STK1-63 主要技术参数见表 2.13-6。
- 4) 产品外观。STK1-63 产品外观如图 2.13-7 所示。

表 2.13-4 产品规格和主要技术参数					
产品 型号	额定电流 (A)	极数	$I_{\Delta n}$ (A)	额定电压 (V)	额定短路 分断能力 (kA)
NB1L-40	1,2,3,4,6,10,16,	1P+N 2P 3P 3P+N 4P	0.03 0.1 0.3	230、 400	6
NB1L-40H	20,25,32,40				10
NB1LE-40	6,10,16, 20,25,32,40				6
NB1L-63	50,63				6
NB1LE-63					6

2.3 熔断器组合电器

- (1) HG30 熔断器式隔离器。HG30 熔断器式隔离器以上海电器陶瓷厂有限公司产品为例进行说明。
- 1) 用途。适合于交流 50Hz, 额定工作电压至 380V, 额定工作电流至 63A 的线路中, 主要作为对线路的过载和短路保护, 并具有电源隔离功能。产品符合 GB 14048.3—2002《低压开关设备和控制设备 第 3 部分: 开关、隔离器、隔离开关及熔断器组合电器》。
- 2) 结构特点。①适合非熟练人员使用, 额定电流不同, 手柄也不同, 以配装不同额定电流的熔断器; ②对于专业人员使用时, 32A 的手柄可安装 RT14-20 熔断体, 额定电流 2~32A, 尺寸均同; ③可带有熔断体熔断信号装置; ④具有 P+N 结构。
- 3) 主要技术参数。HG30 主要技术参数见表 2.13-5。

表 2.13-6 STK1-63 主要技术参数						
额定工 作电流 (A)	额定工 作电压 (V)	使用 类别	额定限制 短路电流	配用 熔断体 型号	额定电流 (A)	
			电流 (kA)		熔断体	熔体
63	380	AC-22	20	D02	63	20,25,35, 50,63
	250	DC-21	8			

- (3) RT30 有填料圆管式熔断体。
- 1) 用途。适合于额定电流不超过 63A, 额定电压为交流 50Hz, 220V 和 380V 的电路中作线路过载和短路保护之用, 主要供 HG30 熔断器式隔离器使用。产品符合 GB 13539.1、GB 13539.3、GB 13539.5。
- 2) 结构特点。不同额定电流的熔断体具有不同尺寸,

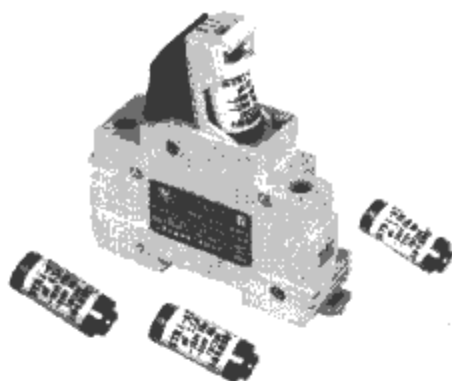


图 2.13-7 STK1-63 产品外观

以防用户用错, 适合非熟练人员使用。

3) 主要技术参数。RT30 主要技术参数见表 2.13-7。

表 2.13-7 RT30 主要技术参数

额定电 流(A)	额定电 压(V)	额定耗散 功率(W)	额定分断 能力(kA)	约定时间和约定电流	
				不熔断电流	熔断电流
6	220	1.0	6	$I_{nf}=1.25I_N$ 1h 内	$I_{nf}=1.6I_N$ 1h 内
10		1.3			
16		2.3			
20	380	2.6	10		
25		3.2			
32		3.2			
63		6.8			

4) 外形尺寸。RT30 外形尺寸见表 2.13-8。

表 2.13-8 RT30 外形尺寸

额定电流 (A)	长度 (mm)	直径 (mm)
6	$23.0^{0}_{-0.8}$	6.3 ± 0.1
10	$23.0^{0}_{-0.8}$	8.5 ± 0.1
16	25.8 ± 0.4	10.3 ± 0.1
20	31.5 ± 0.5	8.5 ± 0.1
25	31.5 ± 0.5	10.3 ± 0.1
32	38 ± 0.5	10.3 ± 0.1
63	$35.0^{+0.3}_{-0.1}$	16.7 ± 0.1

5) 产品外观。RT30 产品外观如图 2.13-8 所示。

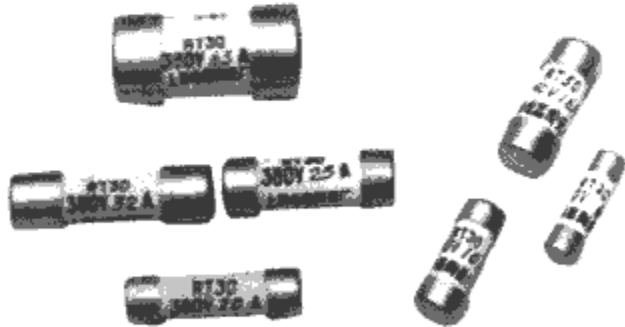


图 2.13-8 RT30 产品外观

2.4 模数化终端组合电器

模数化终端组合电器以上海天益电气股份有限公司产品 PZ36 为例进行说明。

(1) 用途。适用于额定电压为 220V 或 380V、单排负载总电流不小于 100A 的单相三线或三相五线的末端电路中, 对用电设备进行控制、配电, 对线路的过载、短路、漏电、过电压起保护作用。产品符合 JB/T 7121—1993《模数化终端组合电器》、GB/T 19334—2003《低压开关设备和控制设备的尺寸 在成套开关设备和控制中作电器机械支承的

标准安装》等标准。

(2) 结构特点。

1) 造型美观, 外观设计采用标准结构件拼装组合而成, 减少了不同安装回路终端组合电器箱模具的庞大制造成本和塑料零部件的库存总量。

2) 结构合理, 安装时能作全方位调整, 适宜安装各种型号的模数化终端电器, 不需特殊工具既可调节深度, 又可调节水平及上下距离, 调节范围 (mm) 分别为 16, 10, 9, 能确保安装精度和完美性。

3) 使用方便, 预埋箱上、下、左、右和背面均设置有敲落孔, 便于进出线。

4) 便于施工管理, 抽屉式结构, 在施工前阶段可先安预埋箱, 电器元件可在外面组合连线, 调节深度, 施工结束后再放入进行安装接线。

5) 侧开门可根据需要装成左开或右开, 开启角度不小于 120°。

6) 采用高品质阻燃材料, 外壳防护等级为 IP3L0。

(3) 主要技术参数

1) 额定工作电压 (V): 220 或 380。

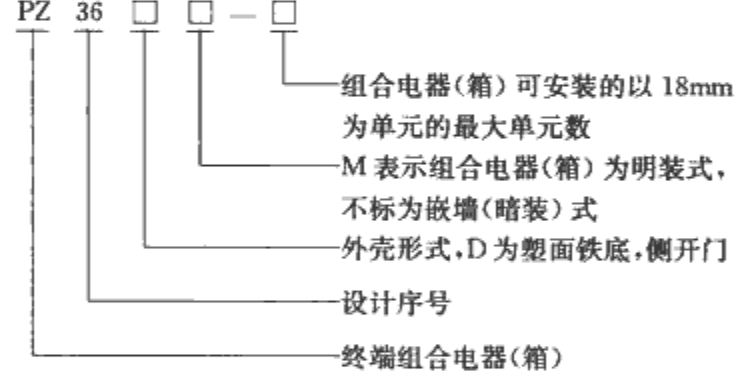
2) 额定绝缘电压 (V): 380。

3) 额定电流 (A): 6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100。

4) 额定短时耐受电流 (kA): 20。

5) 额定工作制: 不间断工作制。

(4) 型号含义。



(5) 分类。

1) 以最大安装的单元分。①8 回路; ②12 回路; ③18 回路; ④2×12 回路; ⑤2×18 回路; ⑥3×18 回路。

2) 以安装形式分。①明装式; ②暗装式。

(6) 外形及安装尺寸。PZ36 外形及安装尺寸见图 2.13-9 和表 2.13-9。

表 2.13-9 PZ36 外形及安装尺寸 mm

型 号	尺寸 回路						
		A	B	C	D	E	F
PZ36D-8	8	262.5	275	221	230		
PZ36DM-8	8	262.5	275	262.5	275	168	124
PZ36D-12	12	325	275	284	230		
PZ36DM-12	12	325	275	325	275	230	124
PZ36D-18	18	437.5	275	396.5	230		
PZ36DM-18	18	437.5	275	437.5	275	342	124
PZ36D-24	24	325	525	284	478		
PZ36DM-24	24	325	525	325	525—	168	364
PZ36D-36	36	437.5	525	396.5	478		
PZ36DM-36	36	437.5—	525	437.5	525	280	364
PZ36-54	54	437.5	775	396.5	730		
PZ36DM-54	54	437.5—	775	437.5	775	280	614

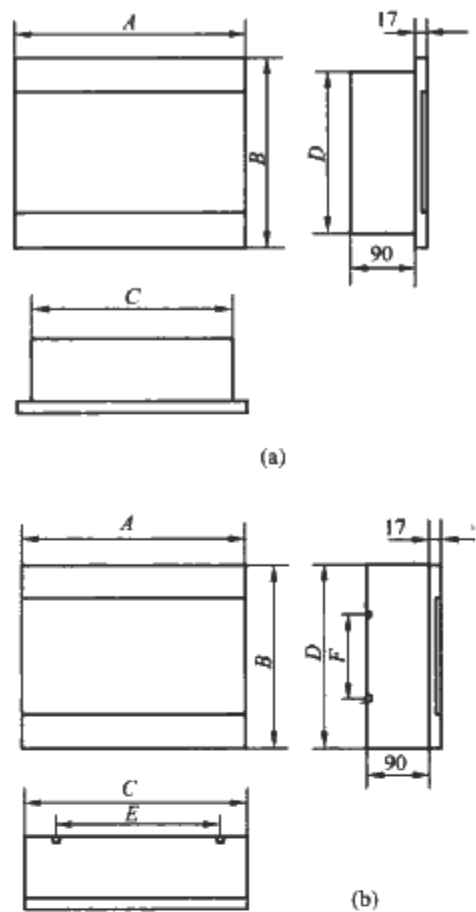


图2.13-9 PZ36 的外形及安装尺寸图 (mm)
(a) 明装式; (b) 暗装式

表 2.13-10 终端电器其他类产品系列、标准、功能和用途与应用

终 端 电 器		标 准	功 能	应用建筑		
				商业	住宅	工业
隔离开关	NH2-100	GB 14048.3、IEC 60947-3	100A 及以下线路中作组合电器总开关，适用于 AC-22 使用类别	✓	✓	✓
	NH3-63 NH3-100	GB 14048.3、IEC 60947-3	作线路与电源的隔离之用，适用于 AC-21 使用类别	✓	✓	✓
	NH4-125	GB 14048.3、IEC 60947-3	作组合电器总开关，适用于 AC-22 使用类别	✓	✓	✓
	NH9-32	GB 14048.3、IEC 60947-3	作线路与电源的隔离之用	✓	✓	
按钮、 信号灯	NP9 按钮	GB 14048.5、IEC 60947-5-1	作接触器等电气线路控制用	✓	✓	✓
	ND9 信号灯	GB 14048.5、IEC 60947-5-1	作信号线等电气线路通断指示用	✓	✓	✓
终端箱	NX2	GB 7251.3—2006 《低压成套开关设备和控制设备 第3部分：对非专业人员可进入场地的低压成套开关设备和控制设备配电板的特殊要求》、IEC 60439-3	终端电路中可具有配电、控制、保护等功能，控制单元 10~18 路可供选择	✓	✓	✓
	NX8	GB 7251.3、IEC 60439-3	终端电路中可具有配电、控制、保护等功能，控制单元 5~24 路可供选择	✓	✓	✓
	NXW1	GB 7251.3、IEC 60439-3	户外配电，终端电路中可具有配电、控制、保护等功能，控制单元 3~5 路可供选择	✓	✓	✓
家用交流接触器	NCH8 家用交流接触器	GB 17885、IEC 61095	控制家用电器和类似用途的低感、微感负载，也可控制家用电动机负载，适用于 AC-7a 使用类别	✓	✓	
电子式时间继电器	NTE8 电子式时间继电器	GB 14048.5、IEC 60947-5-1	在自动或半自动控制系统中，按预定的时间使被控元件动作	✓		✓
附件	XF9 辅助触头	GB 14048.5、IEC 60947-5-1	与 NB1 或 NBH8 系列断路器配装，作断路器远距离通断信号指示	✓	✓	✓
	S9 分励脱扣器	GB 14048.5、IEC 60947-5-1	与 NB1 或 NBH8 系列断路器配装，作远距离分励脱扣操作	✓	✓	✓
	V9 欠电压脱扣器	GB 14048.5、IEC 60947-5-1	与 NB1 或 NBH8 系列断路器配装，作线路欠电压保护用	✓	✓	✓

2.5 终端电器其他类产品

终端电器其他类产品品种规格较多，生产厂家及产量较少。以正泰生产的品种及产量较多，现列出其生产的产品系列、标准、功能和用途与应用，见表 2.13-10。

2.6 国外在我国的主要厂商和主要产品

2.6.1 小断路器系列

(1) 施耐德公司的小断路器系列产品规格和主要参数见表 2.13-11。

(2) ABB 公司的小断路器系列产品规格和主要参数见表 2.13-12。

(3) SIEMENS 公司的小断路器系列产品规格和主要参数见表 2.13-13。

2.6.2 剩余电流动作断路器系列

(1) 施耐德公司的剩余电流动作小断路器产品规格和主要参数见表 2.13-14。

(2) ABB 公司的剩余电流动作小断路器产品规格和主要参数见表 2.13-15。

(3) SIEMENS 公司的剩余电流动作小断路器产品规格和主要参数见表 2.13-16。

表 2.13-14 施耐德公司的剩余电流动作小断路器系列规格和主要参数							
产品型号 项目	C65 系列漏电附件			DPNa vigi	Vigi DPN ELE (G)	Vigi DPN ELM	NC100 系列
	VigiC65ELE	VigiC65ELEEG	VigiC65ELM				Vigi NC100
额定电压(V)	230/400	230/400	230/400	230	230	230	220/415
额定电流(A)	≤40,≤63	≤40,≤63	≤32,≤40,≤63	10~20	≤25,≤40	≤25,≤40	
分断能力(kA)				4.5			
额定剩余动作电流(mA)	30	30	30	30	30	30	30,300,500
过电压保护功能		有			“G”功能有		
隔离功能				有			
极数	1P+N,2P,3P,4P	1P+N,2P	2P,3P,4P	1P+N	1P+N	1P+N	2P~4P
脱扣特性				C	—	—	
接线能力(mm ²)	35			35			35
符合标准	GB 16917/IEC 61009						

表 2.13-15 ABB 公司的剩余电流动作小断路器系列规格和主要参数							
产品型号 项目	GS250S		GS260	DS250S 电磁式	DS260 电磁式	DS9 电磁式	F360 电磁式
	电子式						
额定电压(V)	230	230/400	230/400	2 极: 230/400 3、4 极: 400	2 极: 230/400 3、4 极: 400	230	2 极: 230 4 极: 400
额定电流(A)	6~40	6~63	6~63	6~40	6~63	6~40	16~63 32~63
分断能力(kA)	6	6(6~40) 4.5(50, 63)	6	6	6	4.5, 6, 10	需与断路器配合
剩余电流特性	AC	AC	A, AC	AC	A, AC	AC	AC
额定剩余动作电流(mA)	30	30	30, 100, 300	30	30, 300 (S 型: 50, 63A)	30	30, 100, 300
动作时间	瞬动型		AC 型(瞬动型): <100ms A[S]型(选择型): 130~500ms A[G]型 (短延时型): 10~200ms	瞬动型	AC 型(瞬动型): <100ms A[S]型(选择型): 130~500ms	瞬动型	瞬动型
极数	1P+NA	2P, 3P, 4P	2P, 3P, 4P	2P, 3P, 4P	2P, 3P, 4P	1P+NA	2P, 4P
脱扣特性	C	C, D	C, D	C	C, D	C	—
接线能力(mm ²)	0.75~25		0.75~35	0.75~25	0.75~35	16	25
符合标准	GB 16917/IEC 61009						

表 2.13-16 SIEMENS 公司的剩余电流动作小断路器产品系列规格和主要参数				
产品型号 项目	5SU9	5SU1	5SM2	5SM3
额定电压(V)	230 AC	230 AC	230 AC(2P) 400 AC(3P/4P)	230 AC(2P) 400 AC(4P)
额定电流(A)	6~63	6~40	40~63	25~63
额定剩余动作电流(mA)	30	30/300	30/300	30/100/300/500
剩余电流保护类型	AC	A, AC	AC	A, AC
剩余电流保护方式	ELE(电子式)	ELM(电磁式)	ELM(电磁式)	ELM(电磁式)
分断能力(kA)	6	4.5/6/10		
限流等级	3	3		
过电压保护功能	有			
隔离功能	有	有		
极数	1P+N	1P+N	2P, 3P, 4P	2P, 4P
脱扣特性	C	B, C		
接线能力(mm ²)	25			
符合标准	GB 16917/IEC 61009			

3 选用

3.1 小断路器的选用

(1) 脱扣特性。小断路器的重要性能之一是脱扣特性

(又称安秒特性或保护特性)，它与符合的标准有关，常见的几个标准特性见图 2.13-10。图中 1 是指各极串联时冷态热脱扣特性极限曲线，2 是指两极串联时电磁脱扣特性极限曲线。
GB 10963 对脱扣器的型式、脱扣特性和脱扣电流范围的具体规定见表 2.13-17。

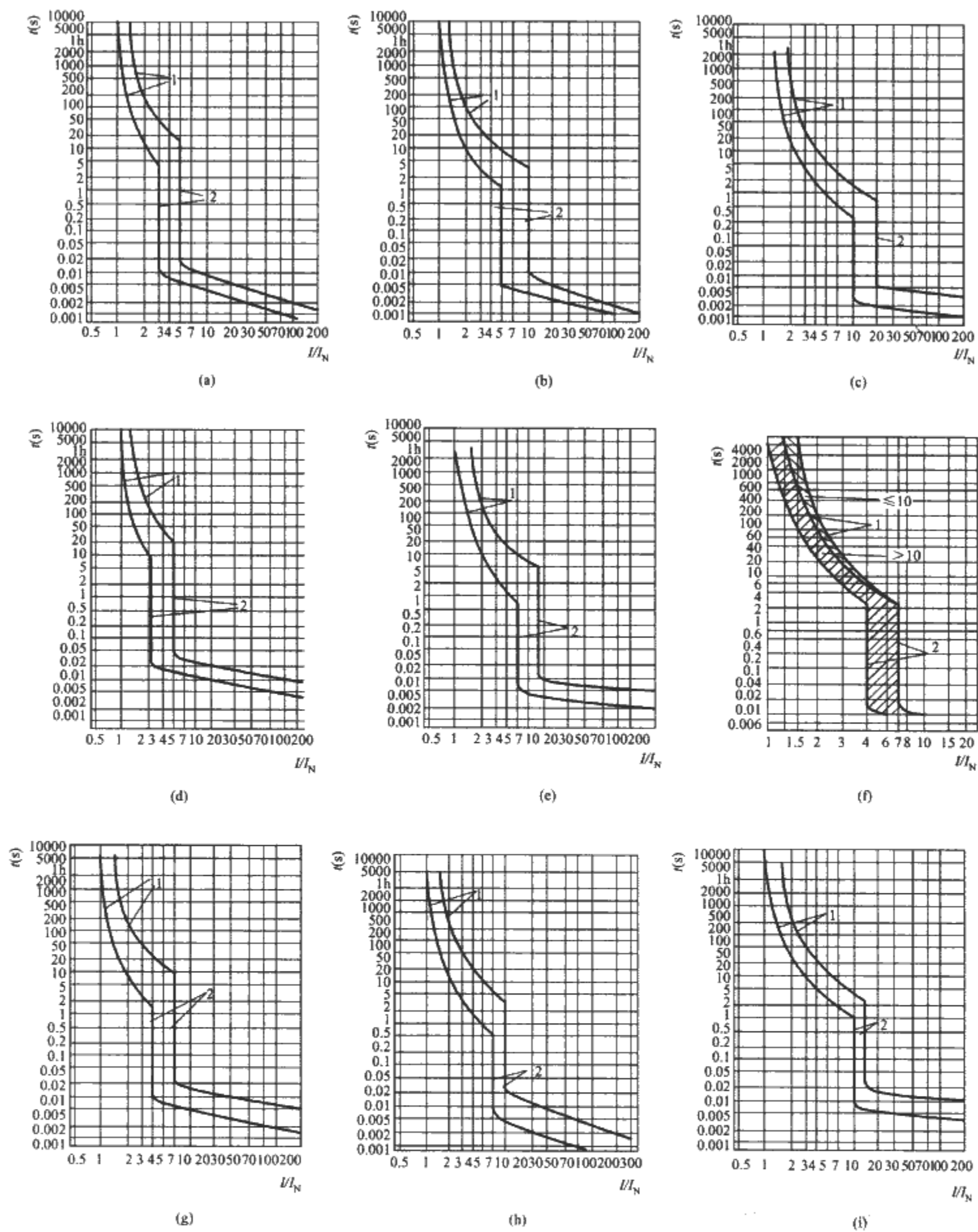


图 2.13-10 常见的几个标准特性
(a) B型; (b) C型; (c) D型; (d) L型; (e) U型; (f) 无分类; (g) 2型; (h) 3型; (i) 4型

表 2.13-17 GB 10963 对脱扣器的型式、脱扣特性和脱扣电流范围的具体规定

试 验	脱扣器型式	起始状态	试验电流	脱扣或不脱扣时间极限	预期结果	脱扣电流范围
a	B、C、D	冷态	$1.13I_N$	$t \leq 1h$ (对 $I_N \leq 63A$) $t \leq 2h$ (对 $I_N > 63A$)	不脱扣	B ₂ $> 3I_N \sim 5I_N$ C ₂ $> 5I_N \sim 10I_N$ D ₂ $> 10I_N \sim 20I_N$
b	B、C、D	紧接上项试验后进行 (5s内上升至规定值)	$1.45I_N$	$t < 1h$ (对 $I_N \leq 63A$) $t < 2h$ (对 $I_N > 63A$)	脱扣	
c	B、C、D	冷态	$2.55I_N$	$1s < t < 60s$ (对 $I_N \leq 32A$) $1s < t < 120s$ (对 $I_N > 32A$)	脱扣	

续表

试 验	脱扣器型式	起始状态	试验电流	脱扣或不脱扣时间极限	预期结果	脱扣电流范围
d	B	冷态	$3I_N$	$t \leq 0.1s$	不脱扣	$B_t > 3I_N \sim 5I_N$ $C_t > 5I_N \sim 10I_N$ $D_t > 10I_N \sim 20I_N$
	C		$5I_N$			
	D		$10I_N$			
e	B	冷态	$5I_N$	$t < 0.1s$	脱扣	
	C		$10I_N$			
	D		$20I_N$			

有多个保护极的断路器，当只有一个保护极从冷态开始通以下列电流时应在规定时间内脱扣：①对带两个保护极的两极断路器，为 $1.1 \times 1.45I_N$ ；②对三极和四极断路器，为 $1.2 \times 1.45I_N$ 。

(2) 额定值随温度变化的增减率。小断路器的过载保护特性通常采用采样元件（电阻）和感应元件（热双金属片）来完成。热双金属片受热弯曲而超过某一限度时，脱扣器跳扣，小断路器断开而切除故障电流。在断路器标准中，规定了脱扣特性的基准温度，不同的标准规定的基准温度是不同的，因此应考虑到环境温度不同于校验的基准温度时，对其额定电流作修正。此外，标准中规定的校验条件是孤立的一台小断路器，而实际使用时，该外壳内的环境要比较验时的温度高，为此对产品的额定值也要作必要的修正。

不同标准规定的基准温度如下：

- 1) GB 10963.1、IEC 60898-1，基准温度 30℃。
- 2) BS 3871、IEC 157-1，基准温度 40℃。
- 3) CEE 19-2（欧共体标准），基准温度 20℃。

按不同基准温度设计和校验的产品，其实际可使用电流随着环境温度的升降而降低或升高，并与产品本身参数有关。分析各种型号的产品后，表 2.13-18～表 2.13-20 所列升降值可供参考。

表 2.13-18 以 20℃ 为基准的产品
实际可使用电流与温度关系 A

额定电流 (A)	20℃	30℃	40℃	50℃	60℃
4	4	3.8	3.6	3.4	3.1
6	6	5.6	5.1	4.6	4
10	10	9.4	8.7	8	7
16	16	14.9	13.6	12.2	10.5
20	20	19	18	16.5	15.5
25	25	23.5	22	20.5	19
32	32	30	27.5	25	22
38	38	35	32	28	24

表 2.13-19 以 30℃ 为基准的产品
实际可使用电流与温度关系 A

额定电流 (A)	20℃	30℃	40℃	50℃	60℃
4		4	3.8	3.6	3.4
6		6	5.6	5.1	4.6
10		10	9.4	8.8	8.1
16		16	14.4	14	13.3
20		20	18.8	17.6	16.2
25		25	23.4	21.9	19.9
32		32	29.9	27.4	24.8

表 2.13-20 以 40℃ 为基准的产品
实际可使用电流与温度关系 A

额定电流 (A)	20℃	30℃	40℃	50℃	60℃
2	2.2	2.1	2	1.9	1.7
3	3.3	3.2	3	2.8	2.6
5	5.5	5.3	5	4.7	4.4
10	11	10.5	10	9.5	8.5
15	16.5	16	15	14	13

续表

额定电流 (A)	20℃	30℃	40℃	50℃	60℃
20	22	21	20	19	18
25	27.5	26	25	23.5	22
32	35.5	34	32	30	28
40	44.5	42.5	40	37	34
50	56	53	50	46.5	43
63	70	66.5	63	59	55
80	86	83	80	76.5	73
100	108	104	100	95	91

在封闭的小型外壳中，小断路器密装时降容系数可选 0.7～0.8。对于金属防护外壳，通常可采用高值；而对全塑防护外壳，则可采用低值。

【例 2.13-1】 有一小断路器脱扣器额定电流为 20A，该产品上的标志符合 IEC 60898（IEC 60898 规定的基准温度为 30℃），安装在板上，周围环境温度为 40℃，查校验基准温度为 30℃ 的表 2.13-19，即得实际可使用电流为 18.8A。

【例 2.13-2】 表 2.13-19 中的一批额定电流为 20A 的小断路器，并排密装于铁制防护外壳中，当周围环境温度为 40℃ 时，则其实际的使用电流为 $(18.8 \times 0.8) A = 15A$ 。

(3) 额定值的确定。小断路器额定值的选定主要决定于被保护的负载的工作电流。这一工作电流由制造厂直接标出或从额定功率和额定电压简单地算出。据此，可选定所用小断路器的额定电流。

1) 电热器、制冷器和白炽灯负载。电热器、制冷器和白炽灯，在给定电压和功率时可按下式计算其额定电流 I_N ，再按此电流选择小断路器的类型与额定电流，具体可按表 2.13-21 选用。

单相时

$$I_N = \frac{P}{U}$$

三相时

$$I_N = \frac{P}{\sqrt{3}U}$$

表 2.13-21 电热器、制冷器和白炽灯的电流与选用电流

功率 (kW)	220V，单相		380V，三相	
	计算电流 (A)	所选小断路器 (A)	计算电流 (A)	所选小断路器 (A)
1	4.55	5	1.52	2
1.5	6.82	10	2.27	3
2	9.1	10	3	5
2.5	11.4	15	3.8	5
3	13.6	15	4.53	5
3.5	15.9	20	5.3	10
4	18.2	20	6.1	10
4.5	20.5	25	6.83	10
5	22.8	25	7.6	10
6	27.3	32	9.1	10
7	31.8	32	10.6	15
8	36.4	38	12.1	15
9	41	47	13.7	15
10	45.5	47	15.2	20

表 2.13-22 适用于 220V 和 380V 带或不带补偿的高压放电灯。

表 2.13-22 高压放电灯的功率与选用小断路器的额定电流

功率 (W)		所选小断路器的额定电流 (A)
水银蒸气+发荧光的物质	$P \leq 700$	5
	$P \leq 1000$	10
	$P \leq 2000$	15
水银蒸气+金属卤素 (halides)	$P \leq 375$	5
	$P \leq 1000$	10
	$P \leq 2000$	15
高压钠气灯	$P \leq 400$	5
	$P \leq 1000$	10

荧光灯负载时所选小断路器的额定电流取决于荧光灯功率、型式和灯数,表 2.13-23 所列相应选用的断路器的额定电流。其选用条件:环境温度为 25℃,安装在封闭外壳中,无补偿的功率因数为 0.6,有补偿的为 0.86。

【例 2.13-3】 安装 66 个单相 40W 无补偿荧光灯管于 380V 三相电源线,从表 2.13-23 每相 22 个管子查得,应选用 10A 小断路器。

表 2.13-23 荧光灯的功率、数量与选用小断路器的额定电流

单相, 220V 三相+中线, 380/220V										
照明单元类型	管子功率 (W)	每相照明单元数量								
单相 无补偿	20	5	10	15	24	45	66	79	100	116
	40	2	5	7	12	22	33	39	50	57
	65	1	3	4	7	14	20	24	30	36
	80	1	2	3	6	11	16	20	25	29
单相 有补偿	20	7	15	22	34	64	94	113	143	166
	40	3	7	11	17	32	47	57	72	83
	65	2	4	7	10	20	29	35	44	51
	80	2	3	5	8	16	23	28	36	41
两相 有补偿	2×20	3	7	11	17	32	47	57	72	83
	2×40	2	3	5	8	16	23	28	36	41
	2×65	1	2	3	5	10	14	17	22	25
	2×80	1	2	4	8	11	14	17	20	20
2 极或 4 极小断路器 I_N (A)		1	2	3	5	10	15	20	25	32

对于以上各类电器的保护,各小断路器的脱扣器应按各标准进行选择:① IEC 60898、GB10963, B 型;② IEC 157-1, L 型;③ BS 3871, 2 型。

2) 电动机负载。电动机负载下选择小断路器时,首先要正确选择电动机电源的电缆截面积,因为电动机启动时可能造成电压降,必须在容许范围值以内。为此,电缆的工作电流的载流量至少等于 $I_N + I_{st}/3$ 之和。式中 I_N 为电动机额定电流, I_{st} 为启动电流,通常 $I_{st} = (4 \sim 8) I_N$,由电动机类型决定。

启动电动机时容许的电压降,对于公共配电系统为 5%,对于用户支线或下级变压器为 8%。如果被开动的机械在启动期间是低转矩,那么可按电动机额定电流来验算其

电压降;如属高启动转矩(如碾磨机、食品机械、升降机等),则按启动电流来验算电压降。

对每一电动机负载和每一电路,必须提供过载和短路保护。

小断路器用于保护电动机负载时,必须先获得电动机启动电流的大小及持续时间的数据,并参照小断路器保护特性类型,选择所需额定电流的断路器。

在 GB 10963 中指出,该标准不适用于保护电动机的断路器,但制造厂的样本中则推荐 C45AD (具有 D 型脱扣器,适用于电动机负载) 用于有电动机的动力电路。

电动机电路的特点是,在启动时有很大的浪涌电流(见图 2.13-11),操作较频繁。较完整的控制与保护电路与保护特性如图 2.13-11 所示。该电路由小断路器、接触器、热继电器与电动机串联组成。小断路器起短路保护及分断作用;接触器起电动机控制作用;而热继电器则实现过载保护功能。考虑到大惯量电动机的启动电流较大,故应选择 D 型脱扣器(如 C45AD);如启动电流较小,则也可选用 C 型脱扣器的小断路器。

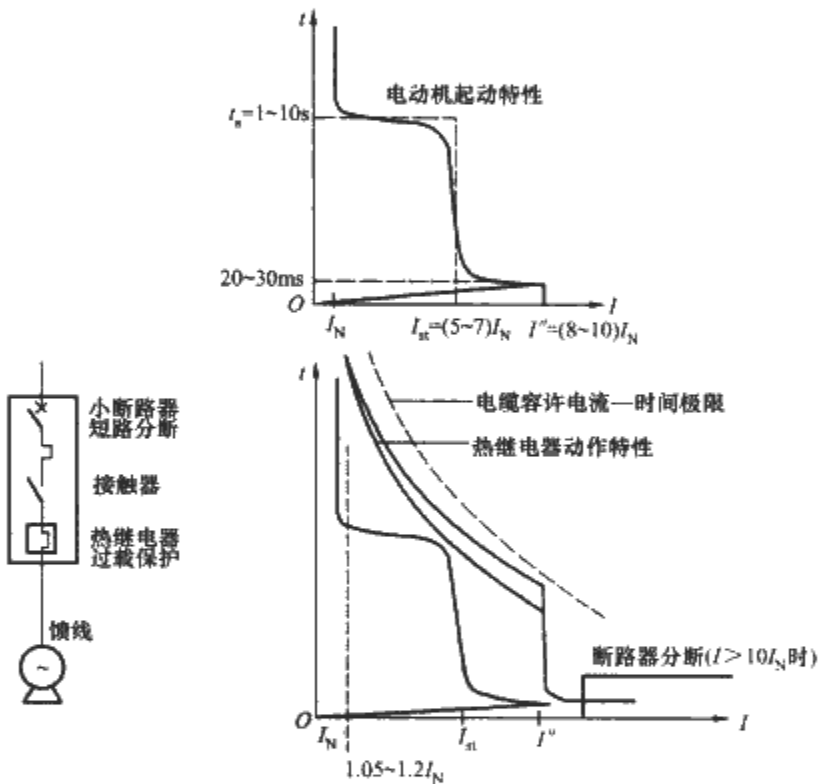


图 2.13-11 电动机的控制与保护电路与保护特性

小断路器与接触器配合使用时涉及的标准有:GB 14048-1、GB 10963、GB 14048、GB 14048-4 等。

(4) 选择性保护。选择性保护又称分级保护,是指在系统中上下级电器之间保护特性的配合。当在某一点出现过电流故障时,指定在这一范围动作的断路器或熔断器动作,而其他的保护电器不动作,从而将受故障影响的负载数目限制到最少,如图 2.13-12 所示。如在下级 D3 处短路,则断路器 Q3 动作而断开,其余断路器 Q1 和 Q2 不应动作,而仍闭合。

选择性分过载区和短路区:

1) 过载区的选择性。断路器的安秒特性是一个反延时曲线。曲线高(如 Q1 曲线)表示过载后到分断的延时时间较长。

对于每个断路器的安秒特性有一个上限及下限,如图 2.13-13 所示。

对于某一个电流 I 来说, t_1' 表示 Q1 最长不断开时间(经过 t_1' 这么长时间的过载, Q1 可能断开), t_2'' 表示 Q2 最长断开时间(经过 t_2'' 这时间的过载, Q2 一定已断开了)。如果断路器 Q1 的 $t_1' > t_2''$, 过载区才有选择性。

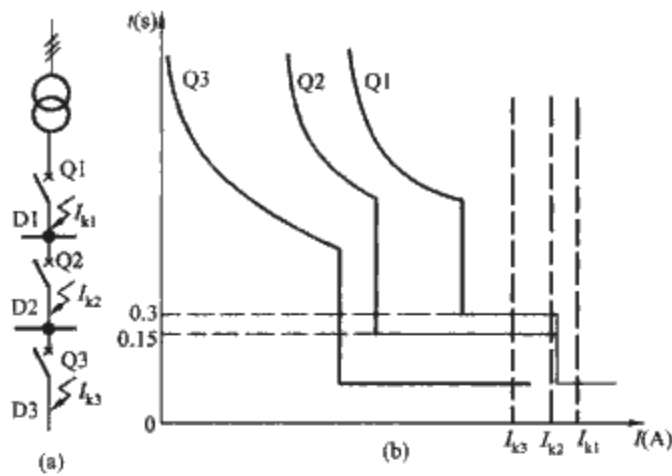


图 2.13-12 三台串联断路器之间的选择性保护
(a) 电路图；(b) 曲线图

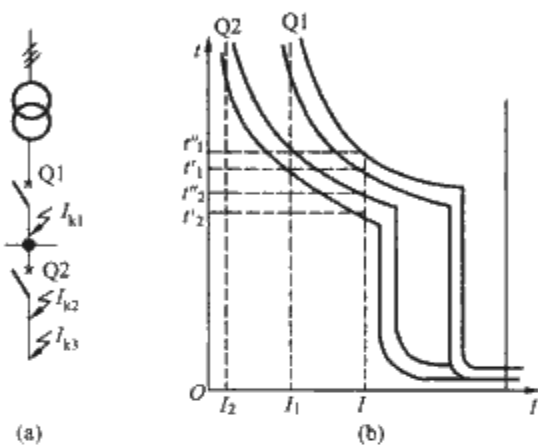


图 2.13-13 两台串联断路器过载区的选择性
(a) 电路图；(b) 曲线图

为了保证在过载区有选择性，必须满足 $I_1/I_2 \geq 2$ 。一般认为，断路器额定电流的 10 倍以内属于过电流范围，超

过此值，就认为属于短路。在短路时，电磁脱扣系统便迅速切断电源。

2) 短路区的选择性。当短路电流流过电磁脱扣系统时，断路器间获得选择性是很困难的。为了得到选择性，一般应使 Q1 的瞬时脱扣电流 I_{M1} 为 Q2 的瞬时脱扣电流 I_{M2} 的 1.4 倍 ($I_{M1}/I_{M2} \geq 1.4$)。

当短路电流大于 I_{M1} 时，要想只有 Q2 断开，Q2 应选限流型断路器。限流型断路器可以减小电流的峰值及持续时间，以免 Q1 断开。而 Q1 最好选用稍具延时脱扣如短延时为 0.4s 的断路器或熔断器。

一般来说，短路电流很大时，很难保证有选择性，至多获得部分选择性，如图 2.13-14 所示。

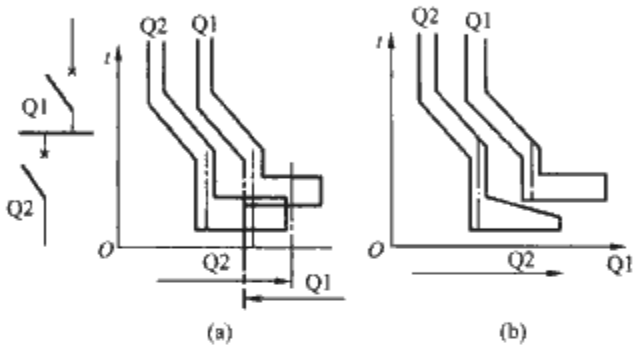


图 2.13-14 短路区的选择性
(a) 分选择性；(b) 完全选择性
Q1—高速断路器；Q2—限流型断路器

注：Q1、Q2 箭头线重叠处可能 Q1、Q2 同时跳，为无选择性区域。

为便于正确选用合适的断路器，以确保上下级之间的选择性，表 2.13-24 所列配合可供参考。

表 2.13-24 DZ30N 及 DZ30 具有选择性的配套表

下级	上级	DZ30 2型特性										DZ30 2型特性										DZ30 4型特性									
		$I_N(A)$	5	10	15	20	25	32	45	1	2	3	5	10	15	20	25	32	40	50	60	1	2	3	5	10	15	20	25	32	40
DZ30 2型	$I_N(A)$																														
		5																				5									
		10																				10									
		15																				15									
		20																				20									
		25																				25									
DZ30 2型	$I_N(A)$	32																				32									
		45																				45									
			28	55	83	110	138	176	248		11	17	28	55	83	110	138	176	220	275	330		24	38	60	120	180	240	300	384	480
		1																				1									
		2																				2									
		3																				3									
		5																				5									
DZ30 4型	$I_N(A)$	10																				10									
		15																				15									
		20																				20									
		25																				25									
		32																				32									
		40																				40									
		50																				50									
DZ30 4型	$I_N(A)$	60																				60									
			28	55	83	110	138	176	248		11	17	28	55	83	110	138	176	220	275	330		24	38	60	120	180	240	300	384	480
		1																				1									
		2																				2									
		3																				3									
		5																				5									
		10																				10									

注 ■表示具选择性。

如电气系统的下级线路中断路器选用 DZ30 2 型脱扣器, 5A; 上级线路中断路器选用 DZ30 2 型脱扣器, 15A, 则从表 2.13-24 中可查得在 83A 以下时具有选择性。

(5) 如何用于直流电路。适于保护直流设备的断路器型号选择, 将主要取决于以下几点:

- 1) 由设备额定值所决定的额定电流。
- 2) 系统型式, 分 1、2、3 三类。
- 3) 额定电压, 这将决定分断所必要的极数。
- 4) 在安装点的最大短路电流, 由此决定需要的断流容量。

表 2.13-25 所列小断路器用作直流电路时的断流能力, 在分断时的极数在括号中表示。由表中数值可见, 24~48V 采用单极即可开断, 而采用两极串联时, 分断能力可以提高; 使用在 125V 电路中, 至少要用两极; 在 250V 的电路中, 则至少要用四极串联才能可靠工作。

表 2.13-25 小断路器直流分断能力 (L/R≤0.015s)

电压 (V)	24/48	125	250
直流分断能力 (kA)	15 (1P+N)		
	10 (1P)	20 (3P)	
	15 (1P)	20 (2P)	50 (4P)
	20 (1P)	20 (2P)	15 (4P)
	30 (2P)		

当蓄电池一端发生短路时, 蓄电池放电电流服从于欧姆定律

$$I_{sc} = \frac{U_b}{R_i}$$

表 2.13-26 按系统类型配置分断极

		系统 1	系统 2	系统 3
		电源有一接地极	电源中间接地	电源与地绝缘
电路图和各种事故种类				
各种事故分析	A	最大 I_{sc} , 仅正极有关	I_{sc} 接近最大 I_{sc} 仅正极有关, 电压为 $U/2$	无关
	B	最大 I_{sc} , 两个极均有关	最大 I_{sc} , 两个极均有关	最大 I_{sc} , 两个极均有关
	C	无关	与 A 相同, 与负极有关	无关
最坏情况		A	A 和 C	B
分断极的配置		分断所需的全部极以串接法接在正极 例: $U=48V, I=15A$, 如同 DZ30, 一极分断, 一极作为电隔离之用; 如用 C45N, 单极就能满足, 但阴极无隔离 	在 $U/2$ 电压下, 分断最大 I 所需的极数应配置于每一极性 例: $U=250V, I=100A, I_{ss}=15kA$, 每极承受电压 $U/2=12V$, 需用 1 台 4 极的 NC100, 每一极性以两个串联极组成 	分断所需的极数分布在两个极性间 例: $U=125V, I=80$, 如选用 NC100, 分断容量为 20kA, 两极串联时, 分断电压为 125V, 一个两极的产品即可, 每一极性一个极

另外图 2.13-16~图 2.13-18 所示接线方式用户可任意选择。

3.2 配电系统和保护装置

(1) IEC 60364-3: 1993《建筑物电气装置 第 3 部分: 一般特性评估》规定的配电系统和允许的保护装置系统特性以符号表示, 字母意义为:

式中: U_b 为最大放电电压; R_i 为内阻, 等值于每个电池内电阻的总和 (常由制造厂以容量安时给出); I_{sc} 为蓄电池端头处短路电流。

【例 2.13-4】 已知容量为 500A·h, 最大放电电压为 240V (2.2V 电池 110 个), 放电电流为 300A, 内阻为每个 0.5mΩ, 电路图如图 2.13-15 所示。试求蓄电池的短路电流 I_{sc} 为多少。

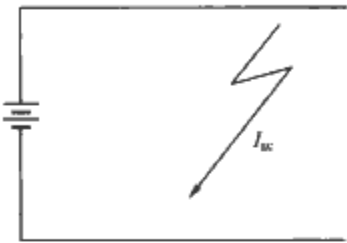


图 2.13-15 [例 2.13-4] 图

解: $R_i = (110 \times 0.5 \times 10^{-3}) \Omega = 55 \times 10^{-3} \Omega$

$$I_{sc} = \frac{240}{55 \times 10^{-3}} kA = 4.4 kA$$

以上计算结果显示短路电流不是很大。如内阻不知道, 则可用以下近似公式算出

$$I_{sc} = KC$$

式中: C 为蓄电池以 A·h 表示的容量; K 为系数, 大约为 10, 有时可达 20。

表 2.13-26 列出了按系统配置分断极的三种情况, 并对各种事故进行了分析, 提供了分断极与负载的接法。

- 1) 第一个字母, 电源接地状况。
T——在某一点上牢固地接地。
I——所有带电零件与地绝缘, 或某一点经阻抗接地。
- 2) 第二个字母, 电气设备外壳接地状况。
T——外壳牢固地接地, 且与电源接地点无关。
N——外壳牢固地接到系统接地点。
- 3) 其后面的字母。

S——中性线和保护导线分别接地。
C——中性线和保护导线共同接地 (PEN 导线)。

TN 系统如图 2.13-19~图 2.13-21 所示; TT 系统如图 2.13-22 所示; IT 系统如图 2.13-23 所示。

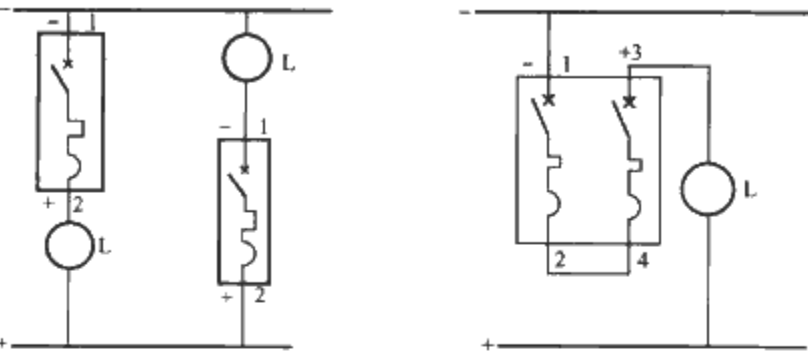


图 2.13-16 接线方式一 (图中 L 为负载)
图 2.13-17 接线方式二 (图中 L 为负载)

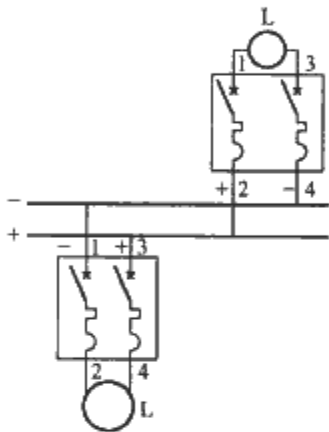


图 2.13-18 接线方式三 (图中 L 为负载)

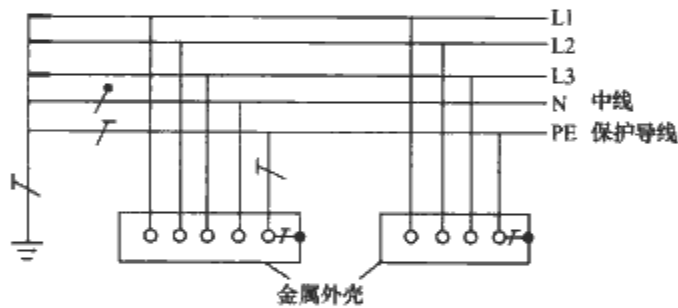


图 2.13-19 TN-S 系统
(在整个系统中中性线和接地线各自独立)

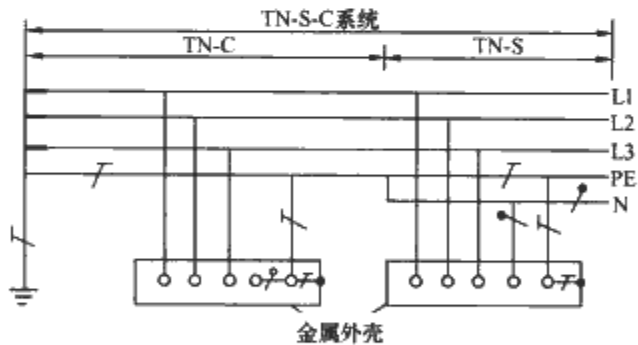


图 2.13-20 TN-S-C 系统
(在系统的一部分中, 中性线和接地线结合在单根的 PEN 导线中)

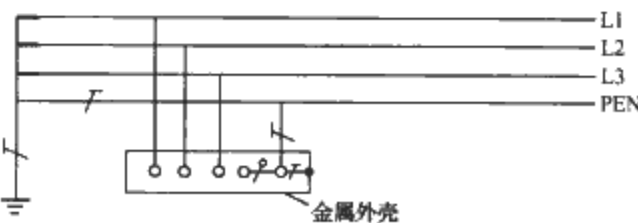


图 2.13-21 TN-C 系统
(在整个系统中中性线和接地线合并在一根 PEN 线中)

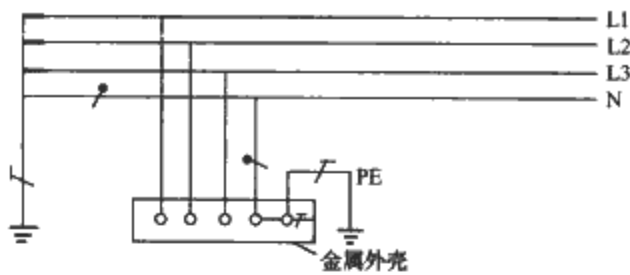


图 2.13-22 TT 系统
(某点牢固地接地, 装置裸露的外壳导电件各自接地)

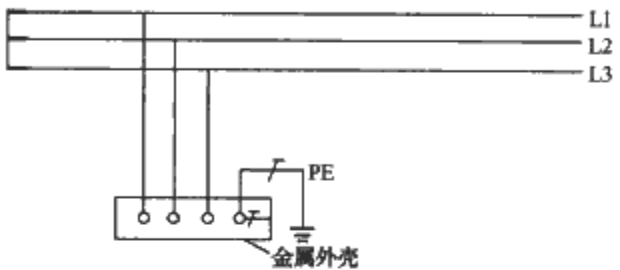


图 2.13-23 IT 系统
(带电零件和接地零件间没有直接连接, 电气装置的外壳牢固地接地)

(2) 三种配电系统允许的保护方式见表 2.13-27。

表 2.13-27 三种配电系统允许的保护方式

系统类型	TN 系统	TT 系统	IT 系统
允许的保护	过电流保护 接地故障保护	过电流保护 电流动作型接地保护 电压动作型接地保护	过电流保护 绝缘监视系统 电流动作型接地保护 电压动作型接地保护
必须满足的条件	$Z_s I_a \leq U_0$ 式中: Z_s 为故障回路阻抗; I_a 为引起自动脱扣的电流, 即额定漏电动作电流 $I_{\Delta n}$; U_0 为接地线上额定电压	$R_A I_a \leq U_L$ 式中: R_A 为外壳接地电阻; I_a 为 $I_{\Delta n}$; U_L 为允许最大接触电压, 在交流时 $U_L = 50V$	$R_A I_d \leq U_L$ 式中: R_A 为接到一个公共接地点的外壳接地电阻; I_d 为漏电流的总和 (系统和地间的电容电流 \approx 接地故障电流); U_L 为最大允许接触电压, 交流为 50V

从表 2.13-27 可见, 剩余电流动作型漏电保护电器以表中所示三种类型的单相或三相系统作接地故障保护。用于这三种系统时漏电保护电器的配置分别如图 2.13-24~图 2.13-26 所示。

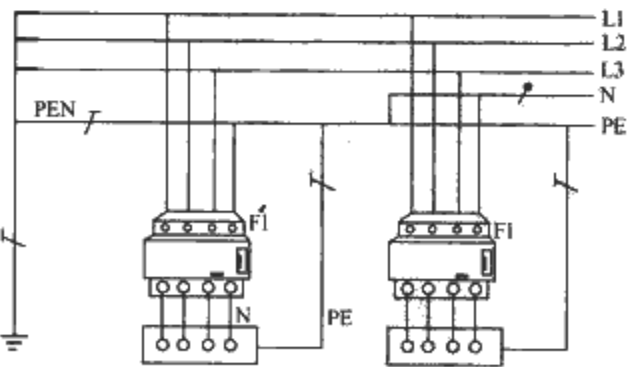


图 2.13-24 漏电保护电器配置之一 (TN 系统)

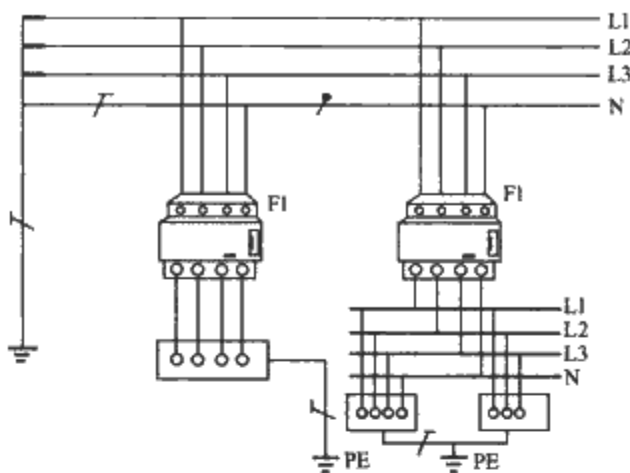


图 2.13-25 漏电保护电器配置之二 (TT 系统)

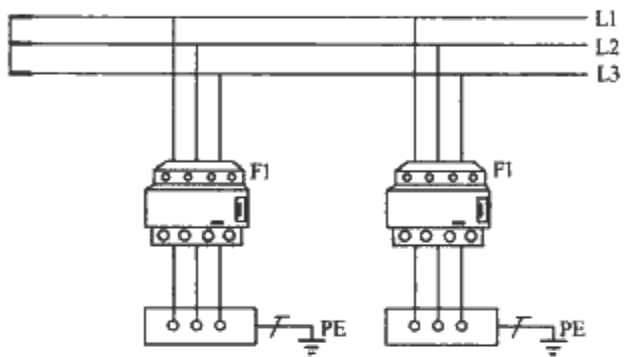


图 2.13-26 漏电保护电器配置之三 (IT 系统)

(3) IEC 关于安全电流与安全电压的规定。

1) 国际电工委员会 (IEC) 提供的人体触电安全界限曲线如图 2.13-27 所示。

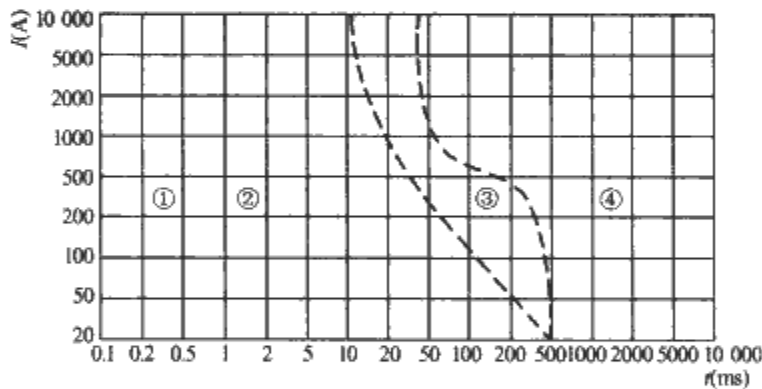


图 2.13-27 人体触电安全界限曲线

图中：①区—不引起人体任何生理反应区；②区—无有害生理性后果区；③区—人体反应随电流和时间的增长而加剧，但尚属可恢复范围；④区—会导致触电人心室颤动，甚至会引起心跳和呼吸停止，并造成严重烧伤等病理性后果。

人体触电安全界限的确定为设计和选用触电漏电保护电器提供了可靠的科学根据。在设计漏电断路器时，必须使动作电流与动作时间落在②区和③区之间。

IEC 60479 规定：50/60Hz 时，剩余电流断路器脱扣特性、交流电流的作用范围，包括额定脱扣电流值为 10mA 和 30mA 的剩余电流断路器的脱扣特性如图 2.13-28 所示。

在额定漏电脱扣电流为 10mA 和 30mA 的脱扣特性中，脱扣时间大大低于 0.2s (200ms) 脱扣时间。这说明，当以外地直接接触带电零部件使电流流过人体时，具有 10mA 和 30mA 脱扣电流的漏电电器可以提供足够的触电保护。

2) 触电保护也可通过确定安全电压来实现，IEC 推荐的普通级别干燥或湿润条件下，安全电压和允许通电时间的关系见表 2.13-28。

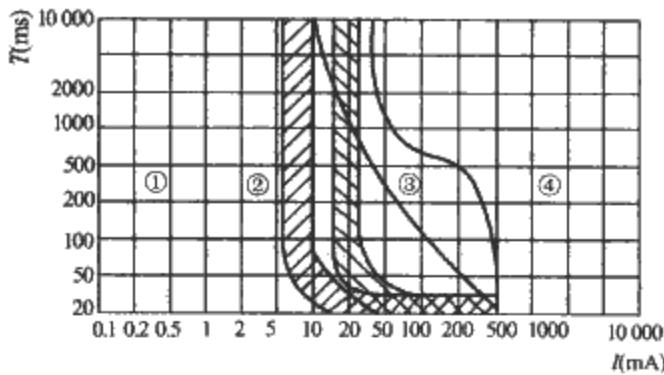


图 2.13-28 剩余电流断路器的脱扣特性

表 2.13-28 安全电压和允许通电时间

接触电压 (V)	<50	50	75	90	110	150	220	280
最大允通时间 (s)	∞	5	1	0.5	0.2	0.1	0.05	0.03

以上安全电流和安全电压都可作为采用防触电措施的依据。

(4) 防火保护。在易引起火灾的地方，在火灾可能发生之前，必须排除绝缘故障。各种标准和规程要求采取适当的措施。例如，德国工业标准 DIN VDE 0100-720—1983《额定电压 1kV 及其以下的电力设备安装：易燃的工作场所》区分辨别下列情况：在短路情况下防火；在接地故障情况下防火。

过电流和短路保护可防止短路时火灾的发生。剩余电流断路器可以对于由于绝缘故障引起的火灾提供保护，但其额定漏电脱扣电流必须不超过 0.5A。利用最大额定漏电动作电流为 0.3A 的保护电器，可达到最佳的保护效果。对于通风不良，容易起火灾的建筑，以及放有易燃品的地方，动作电流应选得低一点，如选动作电流为 0.1A、0.2A 等级的产品。

有时也采用不切断电源而仅对线路绝缘作监视或报警的火灾预防方式，则选用漏电报警器或绝缘监控器。

3.3 剩余电流动作保护电器的选用

3.3.1 剩余电流动作保护电器的类型

- (1) 剩余电流动作断路器 (RCBO，又称漏电断路器)。
- (2) 剩余电流动作保护开关 (RCCB，又称漏电保护器)。

(3) 漏电继电器。是漏电电流达到规定值时动作的控制电器，可与断路器、交流接触器等组成触电、漏电保护装置，与声光元件构成漏电报警器。

(4) 漏电和漏电火灾报警器。它不切断主电路，在出现导致火灾的漏电或危险的故障电压时，发出声或光的警报，适用于自动化程度高、连续生产不允许停电的场合。

以下对使用得较多的漏电断路器和漏电保护器进行介绍。

3.3.2 漏电保护器与漏电断路器 (常统称为漏电开关)

3.3.2.1 漏电保护器 (RCCB)。它具有如下两种功能：

- (1) 手动控制功能。控制对电气设备的下级部分供电或不供电；
- (2) 自动人身保护。电气设备或负载元件在出现绝缘损坏事故时脱扣断开。一旦事故消除，供电可通过重新操作手柄予以恢复。

产品铭牌上标志的有条件短路能力，不是本身具有分断短路电流的能力，而是与上级熔断器或小断路器组合后，在产生过载或短路时，产品具有的耐受能力，而对于过载和短路的保护功能由上级与之组合的产品来完成。产品上的试验

按钮“T”，主要用于检验漏电时元件的动作可靠性，大致每月应检验一次。按下按钮“T”时，产品应自动脱扣。

应注意绝不能在保护性导线 PE 线接上产品。在漏电保护电器后，严禁将中性线与地线接在一起。当采用漏电动作电流为 30mA 的漏电保护器时，照明线长度不宜超过 400m，对于无补偿的 60W 荧光灯，每相不宜超过 12 支。

在使用漏电保护器时，线路的过载和短路保护宜选用与线路导线截面相适应的熔断器或小断路器来保护。

漏电保护器与熔断器式隔离器和小断路器配合使用后的分断能力见表 2.13-29 及表 2.13-30。

表 2.13-29 漏电保护器与熔断器式隔离器配合使用后的分断能力

装于输出级的 漏电保护器		装于上一级的熔断器式隔离器				kA
极数	额定电流 (A)	16	25	32	63	
2P 或 4P	25	6 或 20	20	20		
	40	6 或 20	20	20		
	63					20

表 2.13-30 漏电保护器与小断路器配合使用的分断能力

装于输出级的漏电保护器		装于上一级的小断路器 (C45N)
极数	额定电流 (A)	
2P 或 4P	25	4.5
	40	4.5

3.3.2.2 漏电断路器 (RCBO)。具有断路器的功能，即对电气设备或线路可进行通断控制，同时具有过载反时限保护和短路瞬时开断保护的功能。此外还具有漏电保护器的对人身触电和设备绝缘破坏等事故的保护功能。

漏电断路器通常由三部分组成：零序电流互感器、脱扣装置、锁扣机构和触头系统。

电流互感器铁心必须穿过所有载流导体，如有中性线则也须穿过互感器。在正常情况下，环型电流互感器中由电流流过所感应的磁通互相抵消，铁心中没有磁通存在。相反，如因绝缘破坏等原因而引起故障电流，则失去平衡，铁心中产生电压，该电流经过脱扣机构和断路机构，使电路与绝缘故障部分断开。

漏电断路器的额定剩余动作电流 $I_{\Delta n}$ 可具有以下规格 (mA)：500、300、100、30 和 10 等。不同规格上下级合理配置可组成漏电电流的选择性保护，见表 2.13-31 及图 2.13-29。

表 2.13-31 上下级配置漏电断路器的选择性保护

下级瞬时脱扣的漏电流值 (mA)	上级选择性脱扣的漏电流值				
	100mA	300mA	500mA	1A	3A
10	○	○	○	○	○
30	○	○	○	○	○
100		○	○	○	○
300			○	○	○
500					○

注 ○表示具有选择性保护。

不同漏电动作电流的应用：

(1) $I_{\Delta n}$ 为 10mA 或 30mA。

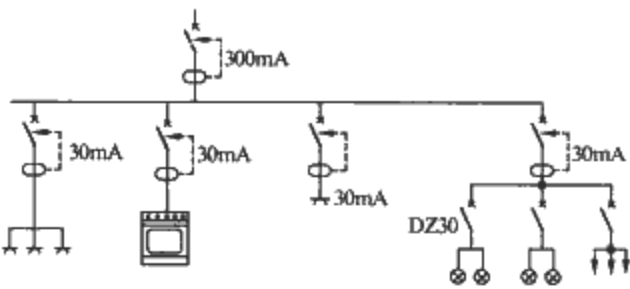


图 2.13-29 上下级配置漏电断路器的选择性保护

- 1) 对直接接触、TT 中性线接地系统予以保护。
- 2) 保护对不直接接触及 IT 中性线不接地系统和 TN 多级接地系统（保护性导线断开等）。
- 3) 保护完全暴露条件（基建场地、游乐园、游泳池等）。

(2) $I_{\Delta n}$ 为 300mA。

- 1) 房屋着火危险保护。
- 2) 对非直接接触及 TT 系统予以保护。

(3) $I_{\Delta n}$ 为 300mA 选择性保护。除对非直接接触及 TT 系统可以保护外，还能对下级装有 30mA 灵敏度的漏电保护系统作选择性保护。这时，仅事故电路被隔离，其余电路仍应保证继续供电。如图 2.13-29 所示为漏电选择性保护的范例。

3.3.2.3 漏电断路器选择电子式好还是电磁式好

如图 2.13-30 和图 2.13-31 所示分别为电磁式和电子式漏电断路器的原理图。在电磁式漏电断路器中，脱扣器释放机构 T 可以是极化继电器或磁性锁闭继电器，前者性能更佳，这种产品在脱扣电路和电源之间没有电的连接。释放机构 T 直接由平衡铁心电流互感器 TA 供给能量，因此不需要辅助电源。正由于这一能量较小，通常对电流互感器和极化继电器的动作灵敏度要求很高，导致成本增高。

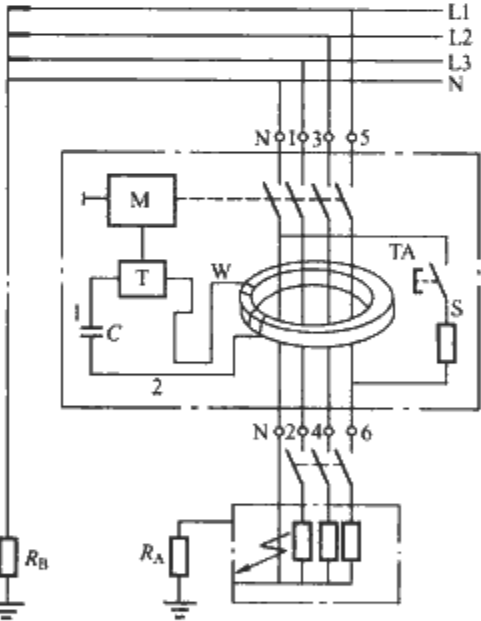


图 2.13-30 电磁式剩余电流漏电断路器原理图

M—断路器机械机构；T—脱扣器；C—电容器；
S—试验装置；W—二次绕组； R_B —接地电阻（系统）； R_A —接地电阻（负载）

在电子式漏电开关中，电流互感器 TA 所给出的信号由电子放大器 A 放大，电子装置中一部分的工作有赖于辅助电源，然后信号加到释放机构 T 上，产生分断动作。电子放大器所需的辅助能量最好与电源无关，如取自蓄电池，但由于它的可靠性不够高、寿命短，所以一般取自电网电源，这样它的工作又与电网有关。系统很易扩大保护功能，如过电压与欠电压保护等。

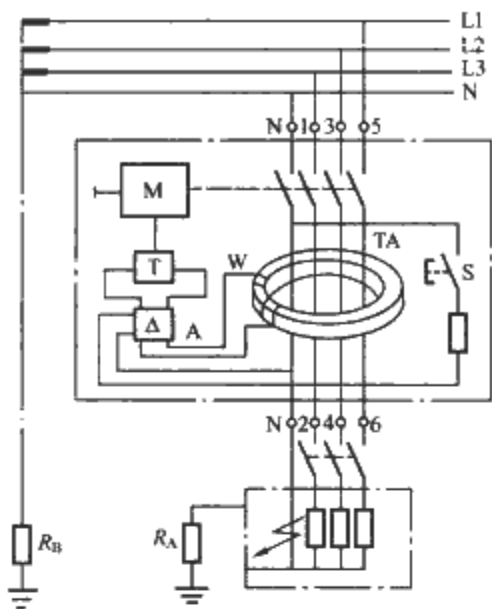


图 2.13-31 电子式剩余电流漏电断路器原理图
M—断路器机械机构；T—脱扣器；S—试验装置；
W—二次绕组；RB—接地电阻（系统）；
RA—接地电阻（负载）；A—电子放大器

电磁式与电子式漏电断路器动作原理的框图如图 2.13-32 所示。

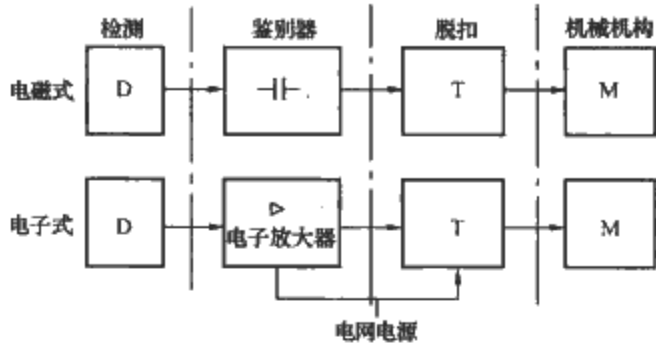


图 2.13-32 电磁式与电子式漏电断路器的动作原理图

两种原理的漏电断路器的综合对比见表 2.13-32。
我国生产的各种漏电保护电器（包括漏电保护器和漏电断路器）大多为电子式和少数电磁式，电磁式价格较贵。用户可根据使用要求参照表 2.13-32 中对比作出选择。

表 2.13-32 电子式与电磁式漏电保护器的对比

项目 型式	与电网关系	电网中线断线	与元件关系		保护功能扩展		抗干扰	耐震性	经济性	使用地区
			互感器	脱扣继电器	过电压	欠电压				
电子式	有关	不能保护	要求低	一般	可能	可能	差	好	便宜	美国
电磁式	无关	能保护	要求高	精密、可靠	不能	不能	好	差	贵	欧洲

3.3.2.4 如何提高系统的安全性

通过把系统分解成几个单独受保护的子系统，可以提高系统的安全性。用一个漏电断路器可以排除系统中任一点上的故障，但它也使接到断路器负载侧上的其他电路被隔断。为防止重要的未受影响的电路被隔断，并为了使故障位置易于寻找，把整个系统分解成几个段，每段都受到其自己的漏电断路器的保护，这样做是合理的。漏电断路器的动作原理要求中性线必须连接到其线路端和负载端。不同漏电断路器的出线必须彼此隔绝和分别布线，如图 2.13-33 所示为如何使中性线和保护导线协调配合。正确的方式使中性线各自分开接至漏电开关，即多路并联使用的漏电开关，其输出端的中性线不能共用。

3.3.2.5 漏电保护电器的选用实例

(1) 电动机负载。按使用设备的性质，允许电动机停电的选用电动机保护用漏电断路器，不允许电动机停转的，则选用漏电报警继电器。

按电动机负载种类确定其脱扣器规格，主要应使热特性、起动电流和漏电断路器的脱扣特性相互匹配，使过电流保护特性适应电动机的起动特性。再按电动机额定电压、电流、极数选取相应参数的漏电断路器。最后，则根据电动机和导线的泄露情况，确定漏电动作电流的大小。表 2.13-33 列出了起动时电动机容量与漏电电流的关系。

表 2.13-33 电动机容量与漏电电流的关系

电动机容量 (kW)	0.2	0.75	5.5	22	45	75	110
漏电电流 (mA)	0.14	0.35	1.57	3.48	6.6	10.54	15.45

(2) 照明负载。对照明电路是否要装漏电断路器，要视实际情况而定。如采用拉线开关与绝缘体为外壳的荧光灯作照明，则可不装；如采用金属链条下挂金属壳固定的荧光灯，则应装设线路保护用漏电断路器，漏电断路器的规格应与照明负载的工作电流相当。漏电动作电流应视线路泄漏电

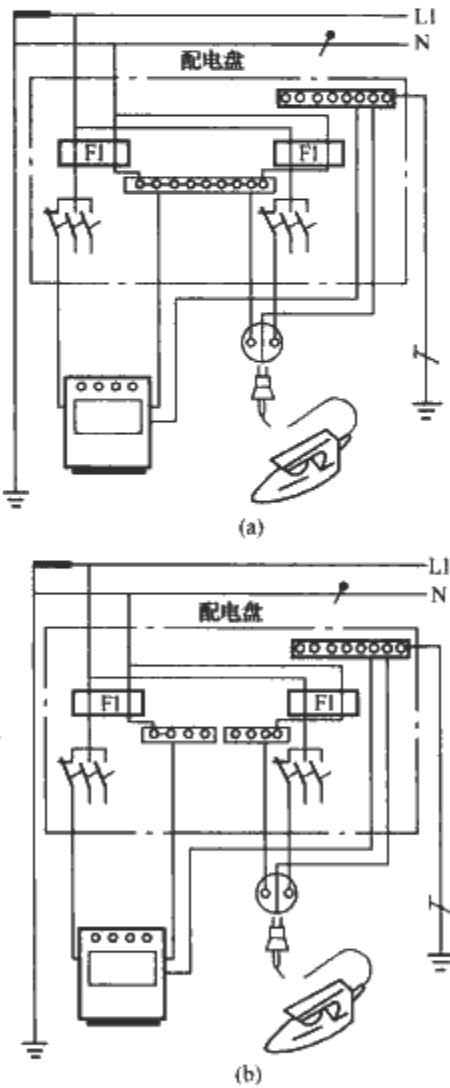


图 2.13-33 中性线与保护导线的协调配合
(a) 错误接线；(b) 正确接线

流而定。

(3) 电热负载。电炉、电熨斗、电热器、电热水器、电被、高频电磁灶等均属电热设备。这类负载的特点是工作电流随温度升高而降低，但漏电电流则随温度升高而增大。如电炉在冷态时的绝缘电阻可大于 100MΩ，加热至 300℃ 时，

只有2~3MΩ。同样，乙烯类绝缘导线的绝缘电阻从20℃升至60℃，绝缘电阻可差几百倍。因此，对电热负载应按热态时的漏电状态选择额定漏电动作电流值。

3.3.2.6 查找故障的方法

如图2.13-34所示为剩余电流断路器脱扣时查找故障的流程。

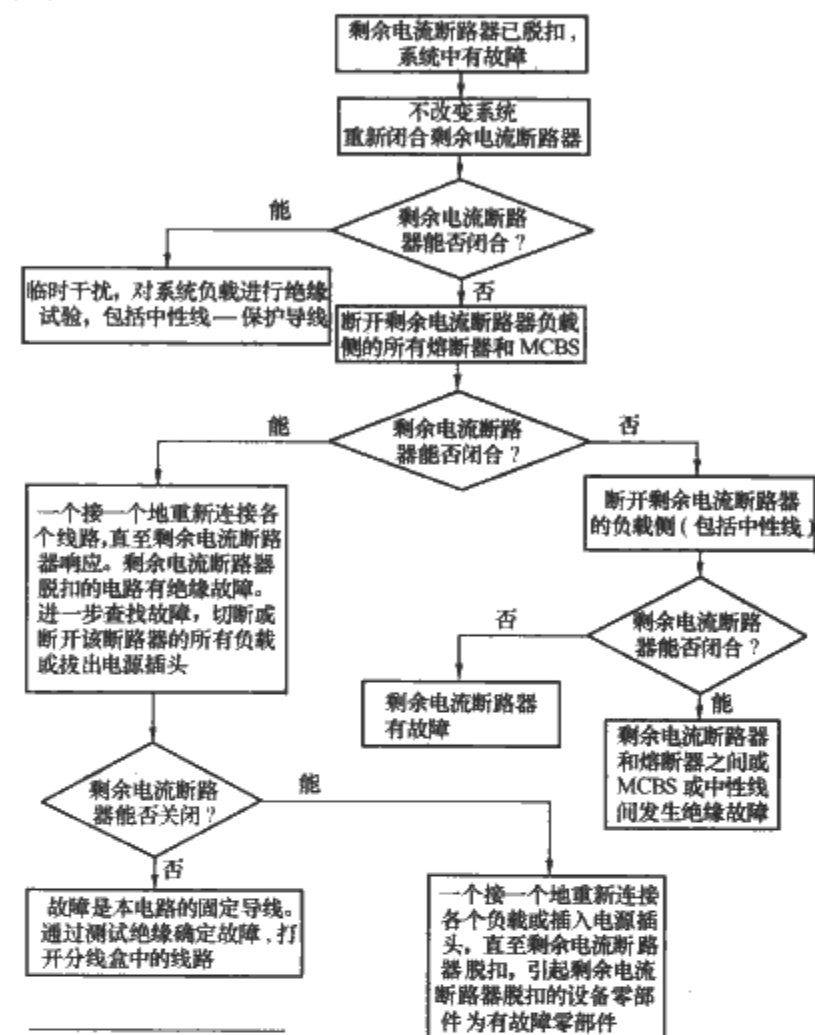


图 2.13-34 剩余电流断路器脱扣时故障查找的流程

3.4 熔断体保护的选用

3.4.1 熔断器保护

现代设备需要高度可靠、安全的保护电器，以尽可能减少因停电造成的损失。熔断器主要作为导线、电缆的过载保护和短路保护，具有无与伦比的品质。按高、新技术标准设计和制造的有填料圆筒式熔断器，在满足各种功能和不同应用方面，具有以下特点：

- (1) 使用和操作安全、简便。
- (2) 功耗低，有利于降低组合电器的温升。
- (3) 分断能力高，无外泄电弧，有利于提高系统可靠性。
- (4) 时间—电流特性长期稳定，不老化。

RT30 和 RT14 熔断体构成的熔断器就能完全满足上述要求。

3.4.2 保护特性

熔断体的使用类别确定熔断体的时间—电流特性带，即包括制造误差在内的熔断体保护特性带。根据熔断器标准规定，用两个字母代号来表示。例如“gG”，表示一般用途全范围分断的熔断体，能分断规定的过载电流至额定分断能力范围内的各种故障电流，这是最广泛使用的熔断体。RT30 和 RT14 系列熔断体属于 gG 熔断体。

如图2.13-35所示是一种交流380V gG熔断体的典型熔断体结构。在过载电流（一般指不超过 $8I_N$ 的过电流， I_N 为

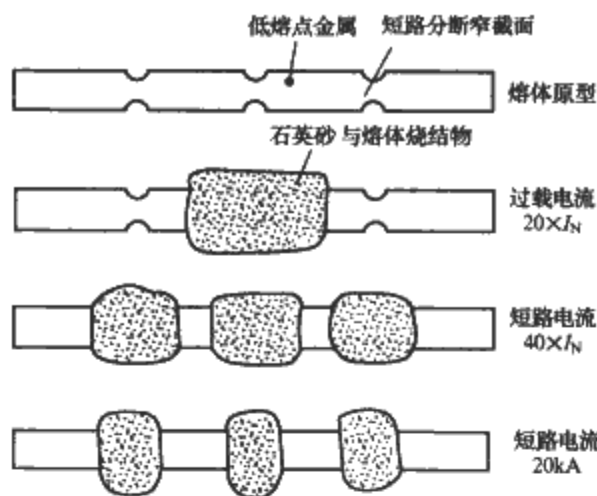


图 2.13-35 380V gG 熔断体的典型熔断体结构

熔断体的额定电流)范围内，熔体在低熔点合金附近熔断。在大约 $8I_N$ （与熔体的尺寸设计和外施电压有关）以上的短路电流下，熔体开始在电流密度最大的窄截面处分断。根据这一现象，现场观察分析熔断体分断后熔体与石英砂烧结物的形状位置，可以判别故障的类型和电流的大致范围。

3.4.3 过电流选择性

(1) 熔断体之间的级间配合。gG 熔断体用于导线和电缆保护时，应正确选择上下级熔断体的额定电流，达到选择性保护的目的，即只使下级额定电流较小的熔断体熔断而上级熔断体不应受损。按额定电流等级确定的熔断体级间配合可按图2.13-36进行选用。

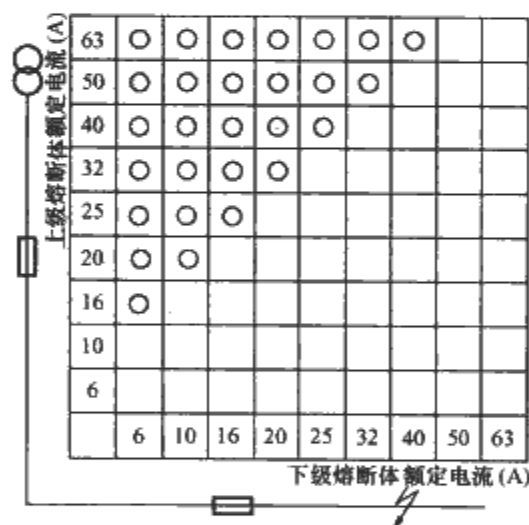


图 2.13-36 熔断体的级间配合

○—可以选用

(2) 熔断体与断路器的级间配合。在断路器的分断能力低于安装地点预期短路电流的情况下，用熔断器作为断路器的短路保护是经济、合理的方案。在应用中，比较断路器和熔断器的时间—电流特性曲线（见图2.13-37），应使两曲线交点处相应的预期电流不大于断路器的分断能力。

在熔断器作为断路器负载支路保护时，应使熔断器的时间—电流特性曲线位于断路器特性曲线的下方，如图2.13-38所示。

实际应用时，上述选择应充分考虑产品的特性误差，应使用时间—电流特性带，并考虑周围空气温度变化产生的影响。

3.4.4 截流特性

gG 熔断体构成的熔断器大约在 $40I_N$ 以上的短路电流时开始呈现截流作用。短路分断的典型示波图如图2.13-39所示。需要较准确地知道截断电流值时，可查看有关产品的截流特性图。现行熔断器产品标准尚未对截断电流的大小作出

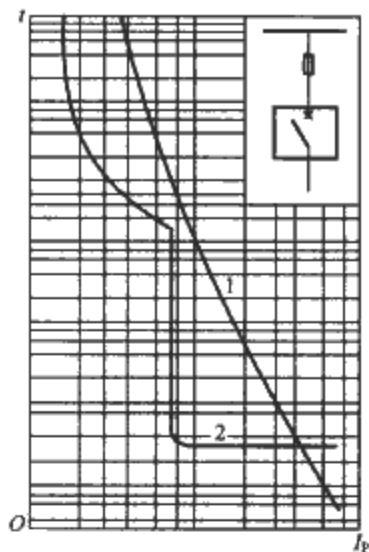


图 2.13-37 熔断器与断路器的级间配合一
1—熔断器的特性曲线；2—断路器的特性曲线

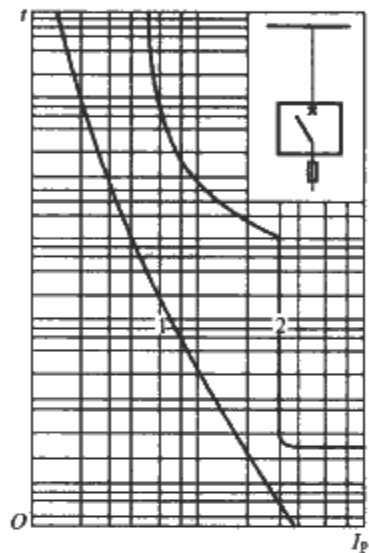


图 2.13-38 熔断器与断路器的级间配合二
1—熔断器的特性曲线；2—断路器的特性曲线

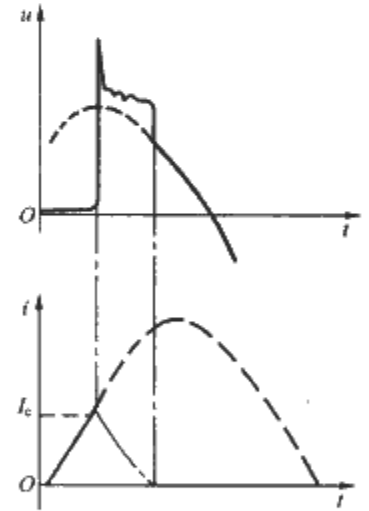


图 2.13-39 短路分断的典型示波图

限定，只要求提供有关数据或特性图。下述公式可对 gG 熔断体的截断电流值作出保守的估计，目前 gG 熔断体产品的截断电流一般都小于按此公式计算的值，而且熔断体的额定电流越小（例如 32A 以下），裕度越大。

$$I_c = 0.24 I_N^{0.64} I_p^{0.33}$$

式中： I_c 为截断电流值，kA； I_N 为熔断体的额定电流，A； I_p 为预期电流有效值，kA。

表 2.13-34		RT30 与 RT14 熔断体的对比									
项 目	RT30							RT14			
额定电压 (V)	220			380				380			
额定电流 (A)	6	10	16	20	25	32	63	2, 4, 6, 10, 16, 20	25, 32	40, 50, 63	

3.4.5 周围空气温度对载流能力的影响

如果不考虑熔断体部件的允许温升，仅从熔断特性角度分析，根据周围空气温度变化对熔断体内熔体熔化温度的影响，图 2.13-40 粗略地给出了熔断体载流能力随周围空气温度变化的修正曲线。

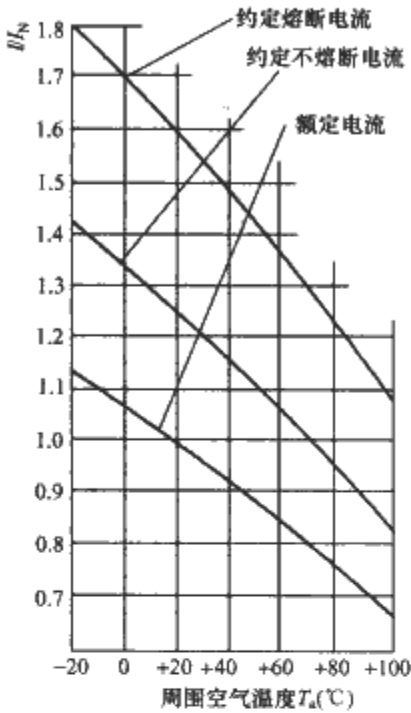


图 2.13-40 熔断体载流能力随周围空气温度变化的修正曲线

【例 2.13-5】 熔断体额定电流 I_N 为 16A，设周围空气温度为 20℃，因电器集中安装使箱体内空气温升达 30K，则按 50℃对熔断体的工作电流进行修正，查图 2.13-40 曲线， $I/I_N \approx 0.88$ 。因此，熔断体的工作电流 $I \approx (0.88 \times 16) \text{ A} \approx 14\text{A}$ 。

3.5 RT30 与 RT14 的差别及各自适用的场所

RT30 适合于家庭或类似用途，即非熟练人员使用的场合，它的最大额定电流仅为 63A，应符合的标准为 IEC 60269-3—2006《低压熔断器第 3 部分：非熟练人员使用的熔断器主要是家用和类似用途的熔断器》的补充要求 A-F 型熔断器标准化系统的实例》。不懂电的人使用熔断体，在更换时应严防用错，因此每挡额定电流对应一种规格的熔体尺寸。同样，在熔断器式隔离器或开关熔断器组中有尺寸与之相适应的手柄或旋转式熔体固紧帽，在设计人员一旦选定某一规格的熔断体后，用户就不能任意自行更换规格，确保了保护性能，避免了老式的可重绕式熔丝在熔断后，用户任意放大熔丝规格，甚至装上铜丝等情况。

RT14 适用于工业用，即由专职的电工使用，它的最大额定电流原为 63A，目前已发展到 125A，符合标准 IEC 60269-1—2006《低压熔断器第 1 部分：一般要求》。由于工业用，额定电压全系列为 380V，短路分断能力为 100kA，比 RT30 要高，因此价格较贵。两者的对比列于表 2.13-34。

如图 2.13-41、图 2.13-42 所示分别为 RT30 和 RT14 熔断体的时间电流特性。

续表

项 目	RT30							RT14		
尺寸 $\phi \times L$ (mm×mm)	6.3×23	8.5×23	10.3×25.8	8.5×31.5	10.3×31.5	10.3×38	16.7×35	10.3×38	14×51	22×58
额定分断能力 (kA)	6			20				100		
价格	便宜			较便宜				贵		
适用场所	家庭、宾馆、商场							工业		

注 ϕ —熔断体两头的直径； L —熔断体的长度。

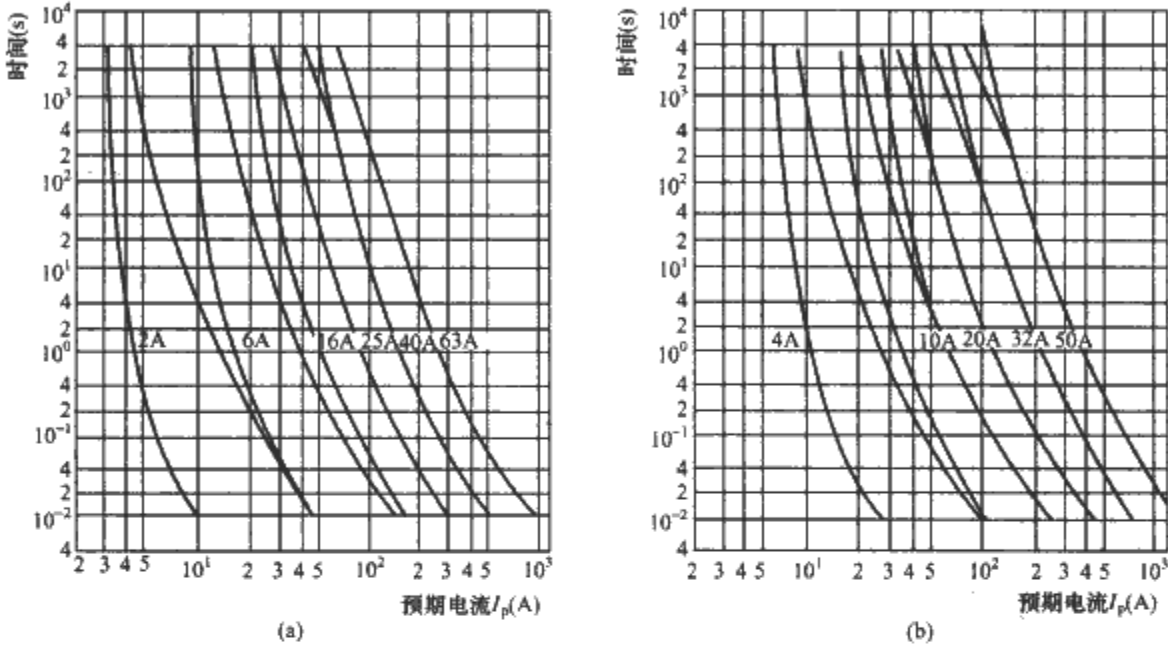
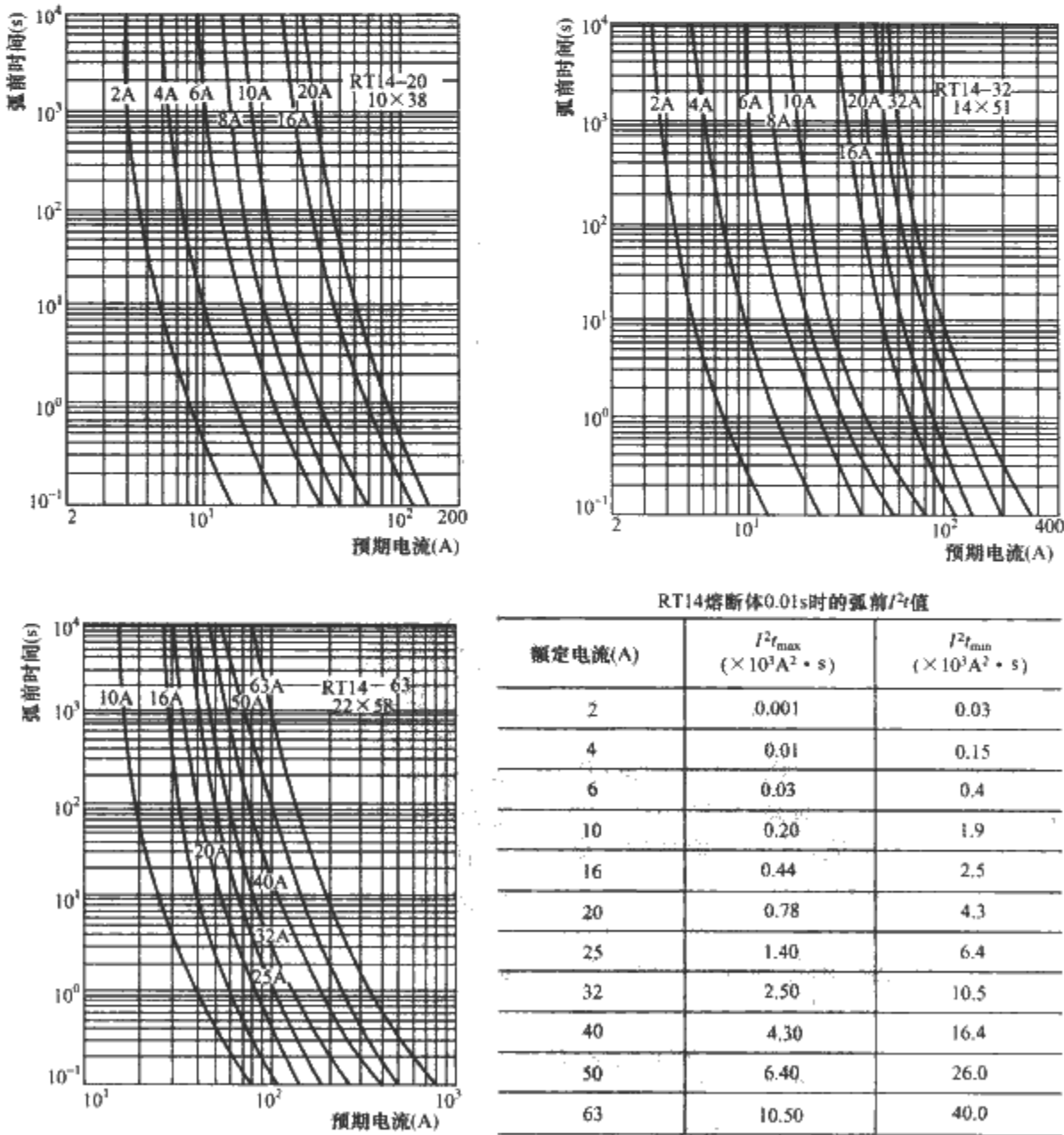


图 2.13-41 RT30 熔断体时间—电流特性
(a) 额定电流 (A) 2, 6, 16, 25, 40, 63; (b) 额定电流 (A) 4, 10, 20, 32, 50



注：时间—电流特性误差（以电流偏差表示）不超过±15%。

图 2.13-42 RT14 熔断体时间—电流特性

3.6 HG30 与 HH30 的差别及各自适用的场所


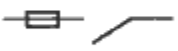
HG30 熔断器式隔离器用在电力线路的末端,作为电源的隔离器,并且有过载和短路保护功能。它的壳体额定电流分为 63A、32A 和 16A 三种。其中 16A 可具有开断中线的触头,当操作隔离器手柄,使熔断体与静触头分开时,中线触头也随之分开,而相线具有较大的断开距离。隔离器可带有各种不同额定值的手柄,以装入相应规格的熔断体后,供熟练人员使用。因此,订货时除说明隔离器额定电流外,还应注明手柄与熔断体的电流。对于工业用 32A 的熔断器式隔离器可装入 32A 以下的各种规格额定电流的熔断体。隔离器触头本身能经受偶尔的带电断开操作。

HH30 开关熔断器组可作手动不频繁地接通与分断电路用,并具有线路的过载和短路保护功能,机械与电气寿命大于 2000 次。因此,在某些场合下,也可作为电气设备的控制与保护开关,它的分断能力由内装熔断体决定,可达 6~20kA。HH30 在更换熔体时,它的操作手柄必然处在打开位置,触头把线路断开,而载熔体的帽子也是绝缘材料压制的,因此非常安全。与隔离器相似,订货时除说明壳体额定电流外,还应说明熔断体型号与额定电流。

HG30 与 HH30 的差别有些方面类似于老产品插入式熔断器与开启式负荷开关(胶盖闸)的差别。但后者老产品的性能远不能与前者相比。

两种产品主要性能的对比见表 2.13-35。

表 2.13-35 HG30 和 HH30 产品主要性能的对比

差别项目	HG30 熔断器式隔离器	HH30 开关熔断器组
使用类别	AC-20B 不频繁地空载闭合和断开	AC-22
额定通断能力	无要求, HG30 能 通断 1.5I _N	通断 3I _N
操作性能(次)	无要求	空载: 8500 有载: 1500
泄漏电流	<0.5mA/极	无要求
符号		

3.7 选小断路器还是选熔断体作保护

小断路器作为线路或微型电动机的过载和短路保护而日益广泛地被使用,近年来产量猛增,它的主要优点是过载、短路后可重复合闸再使用。它的脱扣器分线路用和电动机用两种,不同的用途特性也不同。

熔断体虽可作电路的过载和短路保护,但短路保护功能更强,分断能力高,价格便宜,但出现事故后要更换熔断体,平时必须保存一些备用熔断体。

哪些场合选断路器哪些场合选熔断体作保护?

(1) 小断路器的分断能力通常为 3~6kA,离电源变压器近而要求分断能力超过 6kA 的,则必须选用熔断体作短路保护。

(2) 对于工程造价一定,电气设备价格有限定的,则选熔断体保护可使终端电气设备更便宜。

(3) 对负载变化大且不确定的场所,宜选用熔断体。如插座回路负载,常因插入电器设备变化而电流改变,小断路器过载电流无从匹配,因此应选用熔断器。照明回路也以选熔断体为佳。

(4) 对电涌过电压或剩余电流动作保护开关相配的短路保护,也应首选熔断体。

3.8 模数化终端组合电器的选用

模数化终端组合电器主要用于电力线路末端,是由模数化卡装式电器以及它们之间的电气、机械联结和外壳等构成的组合体。它根据用户的需要,选用合适的电器,通常可构成具有配电、控制、保护和自动化等功能的组合电器。目前深受广大用户喜爱的有 PZ20 和 PZ30 系列两种模数化终端组合电器,现就设计院和使用单位常遇的问题介绍如下。

3.8.1 模数化终端组合电器的系列型谱

全塑外壳和金属外壳模数化终端组合电器的系列典型型谱分别见表 2.13-36 和表 2.13-37。

表 2.13-36 全塑外壳模数化终端组合电器系列型谱

单元数 (以 18mm 为单位)	型 号	外壳防护等级					开门方式
		IP30	IP31	IP41	IP43	IP55	
2,4,5,6	PZ20S 0	✓					无门
6,10,18	PZ20S I	✓	✓	✓			横开门
6,12,18, 24,36	PZ20S II	✓	✓				上下开门
2,4,6, 10,15	PZ30S	✓					上下开门

表 2.13-37 金属外壳模数化终端组合电器系列型谱

单元数 (以 18mm 为单位)	型 号	外壳防护等级					开门方式
		IP30	IP31	IP41	IP43	IP55	
6,10,15, 30,45	PZ20J	✓	✓				横开门
6,10,15, 30,45	PZ20H	✓	✓				横开门
15	PZ20J						上下开门
2,4,6, 10,15	PZ30S						上下开门

注 符合 IP43、IP55 外壳防护等级的产品待发展。

3.8.2 PZ30 与 PZ20 的区别

低压电器型号标准规定,型号后的数字是设计序号,30 大于 20,因此有用户误以为 30 比 20 先进。其实 PZ30 与 PZ20 是同时开发的两个系列,它们是分别按两种使用场合设计的。PZ20 按非熟练人员使用场合设计,主要用于家庭和类似场所;PZ30 按熟练人员使用设计,主要用于工业场所。有人比喻前者为用户箱,后者为配电箱。在英国,PZ20 应符合 BS 5486-13,而 PZ30 应符合 BS 5486-12。在 BS 5486-13(consumer unit)非熟练人员用的终端组合电器标准中,强调单相电路和结构上要设有各种保护与防护。如电路上应设置进线隔离开关(主开关),在清扫尘埃、维护、修理以及长时间停电时,由主开关负责切断电源。主开关应设有端子外罩,以便开关在断开位置时,安装载有电压的端子。电器间的连接线上应设有障板,用来防止无意识的直接接触。同时外壳中还应设有挡板,用以挡住接近时可能的直接接触和对电器元件的电弧起防护作用。组合电器电路中,应设置与出线电路数量相等、电流相当的接地端子和中性线接线端子等。至于工业用的 PZ30,则结构上相应要简单得多。组合电器防护外壳中的连接线已朝绝缘组合母排方向发展。这种母排结构紧凑,

耐动热稳定性强,接线方便,不易接错,施工简单。另外 PZ20 的污染等级必须满足 2 级而安装类别(过电压级别)为Ⅲ类,而 PZ30 污染等级必须满足 3 级,安装类别为Ⅱ类。因此,只要电气间隙爬电距离足够,很多三相系统的 PZ20 能代替 PZ30 系列。

3.8.3 外壳尺寸的选择

外壳容量通常以 18mm 的倍数表示,根据用户的使用要求,确定组合方案后,就可算出所用电器元件的总宽度,从而

选择所需的外壳容量,再考虑安装场所需要的防护等级,即可选定型号。有时,组合电器中选用有发热工作原理的电器,则还应验算最大功耗与所选外壳尺寸是否允许。按发热原理工作的电器有熔断体、小断路器和某些漏电保护开关(有热保护的)。推荐外壳尺寸条件下,铜壳结构时和全塑结构时壳内平均温度 θ 与容许功率损耗的关系分别如图 2.13-43、图 2.13-44 所示。

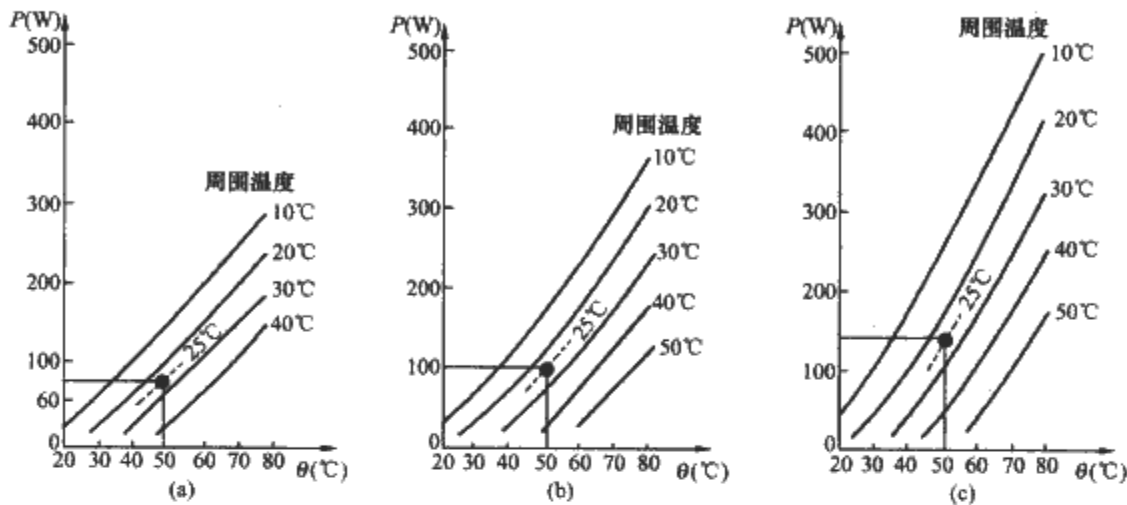


图 2.13-43 钢壳结构时壳内平均温度 θ 与容许功率损耗的关系
(a)外壳尺寸(高×宽×深)(mm):332×600×380;(b)外壳尺寸(mm):500×600×380;
(c)外壳尺寸(mm):752×600×380

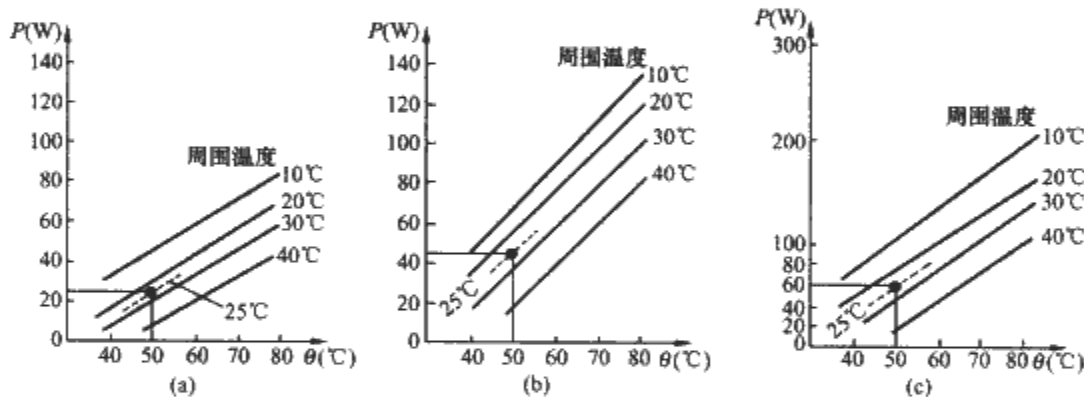


图 2.13-44 全塑结构时壳内平均温度 θ 与容许功率损耗的关系
(a)外壳尺寸(mm):153.5×307×167;(b)外壳尺寸(mm):307×307×167;
(c)外壳尺寸(mm):614×307×167

图 2.13-43 和图 2.13-44 中各种尺寸壳体外表面积所耗散的功率损耗可从曲线中读出。在使用时,应注意壳内上半部的温度较高,下半部较低。因此,在临界情况下,负载较高的电器应安装在壳体的下半部。

在明确了安装在壳内的电器、环境温度和允许温度后,就可以确定各种尺寸的壳体表面能耗散的最大功耗,必要时应选尺寸大一号的外壳。表 2.13-38 所列为熔断体与小断路器的功耗。

表 2.13-38 熔断体与小断路器的功耗

产 品		在不同额定电流时的功耗 (W)								
		6A	10A	16A	20A	25A	32A	40A	50A	63A
熔断体	RT30	1	1.3	2.3	2.6	3.2	3.2	4	5	6.8
	RT14	≤3			≤5			≤9.5		
(PX200) 小断路器		1.8	1.4	2.2	2.4	2.5	2.8	2.3	2.6	3.2

3.8.4 组合电器的额定电流和约定发热电流

(1) 组合电器的额定电流是指给定电路组合,在 GB/T 14048.1—2006《低压开关设备和控制设备 第1部分:总

则》中规定的正常工作条件下,能保证正常工作的电流,通常以进线电流表征。

(2) 约定发热电流是指某一给定外壳,以预定的电路组合中可能产生最高温升的电路组合,在标准试验条件下,各部件温升不超过规定时可能承受的输出负载电流之和。对于三相电路,应折算为单相电流之和。

【例 2.13-6】 PZ20-15J,其进线主开关为 HL30-100,三相,额定约定发热电流为 100A。试问温升试验应如何进行?

按标准规定,对用于同一外壳中的不同电路组合,应选择可能产生最大耗散功率的一种进行温升试验。如前文所述,最大耗散功率的电器是熔断体,又由于约定发热电流的定义规定对三相电路应折算到单相,因此可列出几种组合,并比较其功耗,见表 2.13-39。

从表 2.13-39 分析可知,总功耗以安装 6 个 16A 熔断体时为最大,再考虑到熔断体密装、外壳中温度大于试验时的基准温度等因素,可选用 10 只 16A 熔体做试验,其试验线路如图 2.13-45 所示。试验中,试验用的连接线截面积与长度仍应按标准规定选定。连接线长度应不小于 1m,而截面积则与电器额定电流有关。

表 2.13-39 组合电器几种组合方案的功耗比较

输出元件电流 (A) / 功耗 (W)			总输出 电流 (A)	功耗 (W)	电器元件宽度 (mm)	
A	B	C			出线	进线
32/3.2	32/3.2	32/3.2	96	9.6	3×18	3×18
2×20/2 ×2.6	2×20/2 ×2.6	20/2.6	100	13	5×18	3×18
2×16/2 ×2.3	2×16/2 ×2.3	2×16/2 ×2.3	96	13.8	6×18	3×18
4×10/4 ×1.3	3×10/3 ×1.3	3×10/3 ×1.3	100	13	10×18	3×18

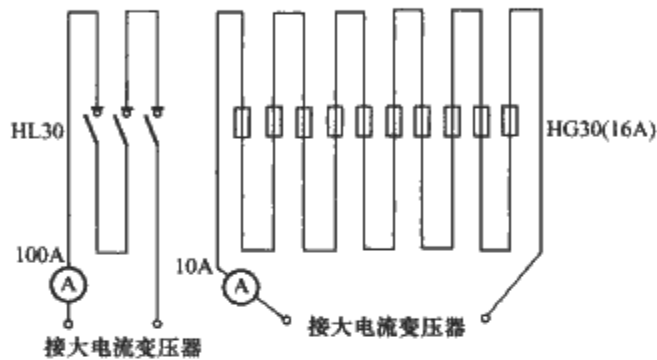


图 2.13-45 试验线路

在组合电器中，各种电器处于同一外壳中，其周围温度是相同的，但各种电器试验时的基准温度是不同的。如熔断体特性试验的基准温度为 20℃；小断路器符合 IEC 60898 时为 30℃，符合 BS 标准时则为 40℃；剩余电流动作保护开关的基准温度则为 40℃。在选用时应予注意，在已知防护外壳箱体内部温度时，应对额定电流值予以修正。

3.8.5 合理的组合方案

常见的户内终端组合电器中，进线开关可选择隔离开关或 100A 断路器。由于 100A 断路器是限流型，通常下级分支开关也是限流式，在分断时的断开时间均小于 5ms，要做到有选择性分断几乎不可能。另外结构设计几乎使得在支路开关前主进线开关后短路的可能性很少，因此进线开关以选用动热稳定性高的 HL30 隔离开关为较佳方案。

用漏电开关作总开关是没有必要的，尤其是照明回路漏电可能性小。而插座回路则可能插入各种家用电器，为此在其前面应设有漏电开关作保护。

3.8.6 预埋箱

终端组合电器设计时附有预埋箱（又称套箱），其功能如下：供建筑施工时预先埋入墙内，待建筑物完工后，再装入终端组合电器；提供共用接线端子，可供几个终端组合电器相互转接；可为电气设计人员赢得时间，先粗略确定预埋箱规格，再进行具体电气设计；防止施工中污损或遗失电器元件或零部件，确保在验收时电器的性能与完整性；使资金不致积压，组合电器箱可在最后阶段订货。

凡是巨型建筑、施工周期长、采用终端组合电器数量较多的工程，施工现场情况复杂的，建议尽可能预埋箱；相反，使用数量少，工程不大，管理比较有条理的，则可以不用预埋箱，以节约造价。

如图 2.13-46 所示为挂墙式（即明装）、嵌墙式终端组合电器安装后的示意图。

如图 2.13-46 (d) 所示为嵌墙式有预埋箱，在安装初期，预埋箱内应撑以木条（见图 2.13-47），以免墙砖荷重压坏套箱，影响终端电器箱的安装。套箱要求与粉刷层平齐，

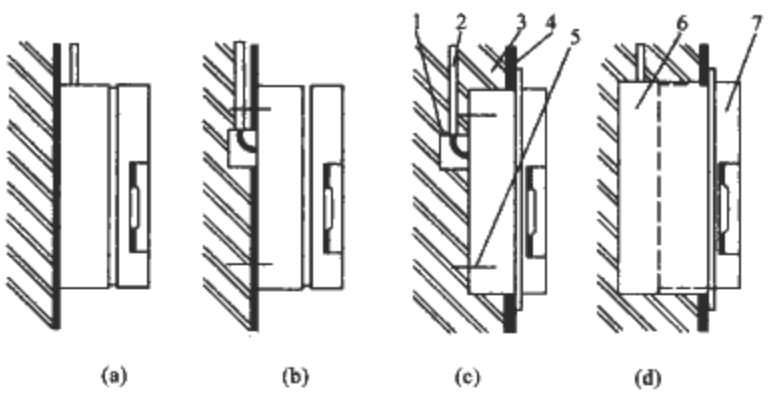


图 2.13-46 终端组合电器安装后的示意图
(a) 明出线；(b) 暗出线；(c) 无预埋箱；(d) 有预埋箱
1—接线盒；2—导线管；3—墙；4—粉刷层；
5—膨胀螺栓；6—预埋箱；7—终端组合电器

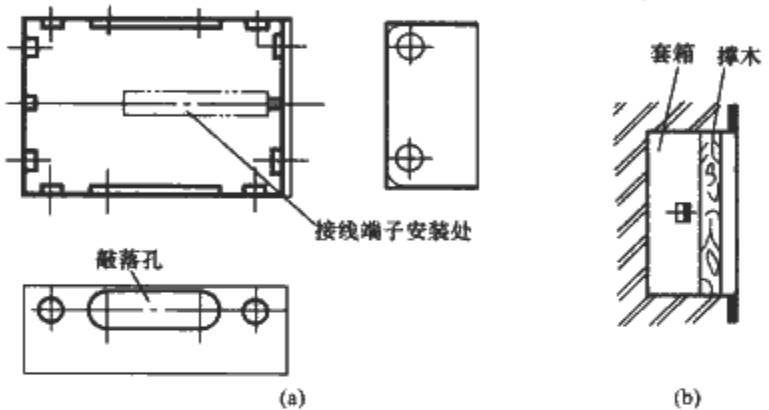


图 2.13-47 套箱和撑以木条后的示意图
(a) 套箱；(b) 套箱安装时撑木条情况

待水泥干后再取下撑木，打开终端电器箱箱盖，就可将其安装在套箱上了。

终端组合电器中元件的拆卸和安装如图 2.13-48 所示。

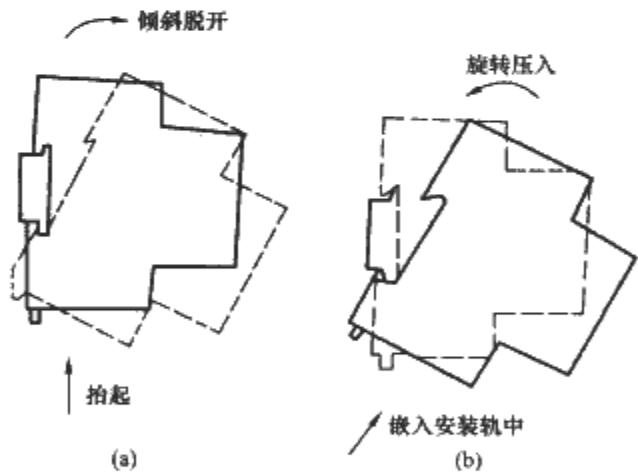


图 2.13-48 终端组合电器中元件的拆卸、安装示意图
(a) 拆卸；(b) 安装

3.9 现代建筑电气设计实例

随着现代高层建筑在国内的迅速发展和室内装饰工程的日新月异，对建筑电器提出了更高、更深和更广的要求，对建筑电器提出性能可能、使用安全、功能多样、品种齐全、造型美观和装拆方便等要求，于是 PZ20、PZ30 系列终端电器应运而生，受到建筑行业的欢迎，并很快得到广泛的应用。其在额定电压为 220V 或 380V、负载总电流不大于 100A 的单相三线或三相五线的电路中，不仅可代替老式的照明配电箱、插座等，也可作为动力配电箱，甚至控制箱等。现介绍在建筑电气设计中使用 PZ20、PZ30 系列终端电器的几种情况。

(1) 商住楼和高级住宅的进户用组合电器（代替老式的

照明配电箱)。进户照明组合电器的进线来自层配电间的电能表箱。进线开关采用剩余电流动作保护开关,出线开关采用小断路器。在这种情况下,对于小型断路器的额定电流与导线截流量的配合,应考虑小断路器在箱体内发热而降低容量的因素。进户用组合电器线路如图 2.13-49 所示。

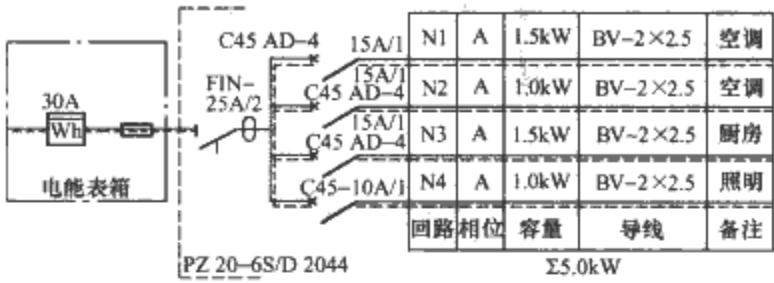


图 2.13-49 进户用组合电器线路示意图

(2) 旅游宾馆的楼层用组合电器 (代照明配电箱)。
这种情况下,一般均设层配电室,强电井设母线槽,出线进入吊顶内的电缆托盘。插入式进线箱内的断路器与母线槽相接。这时层照明配电箱的进线开关采用 HL30 型隔离开关,既便于级间选择性的配合,又有明显的断开点。出线仍采用小断路器。这种情况不仅应考虑小断路器在箱体内因发热而降低容量,又要考虑众多导线在托盘内互相发热而使载流量降低。楼层用组合电器线路如图 2.13-50 所示。

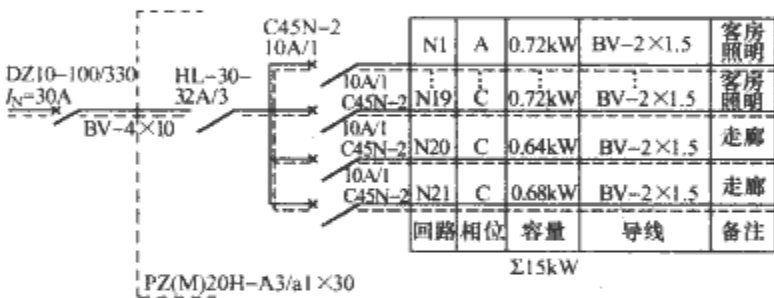


图 2.13-50 楼层用组合电器线路示意图

(3) 车间公共配电用组合电器 (代配电箱)。这时一般从干线 T 形接头出来进配电箱,进线开关采用 HG30 型熔断器式隔离器或 HH30 型开关熔断器组,出线可灵活组合。这时小断路器也要考虑在防护外壳内发热的因素而降低容量使用。公共配电用组合电器线路如图 2.13-51 所示。

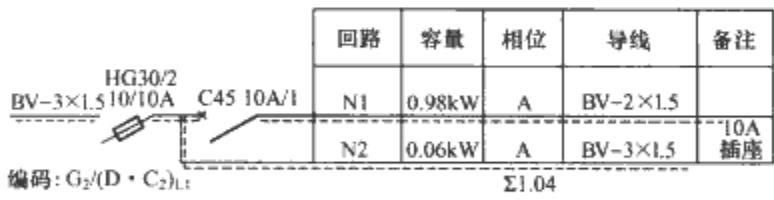


图 2.13-51 公共配电用组合电器线路示意图

(4) 高层住宅电表间带插座的组合电器。电表间带插座的组合电器线路如图 2.13-52 所示。

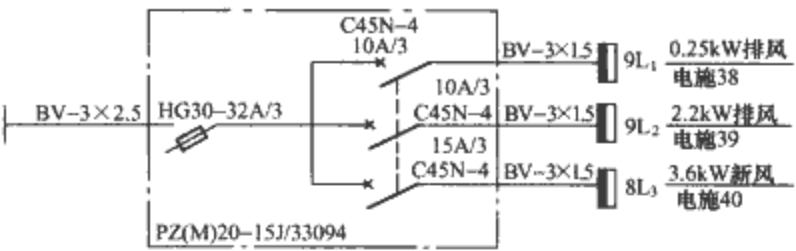


图 2.13-52 电表间带插座的组合电器线路示意图

(5) 要求内带分励脱扣小断路器的组合电器。要求带分励脱扣小断路器的组合电器线路如图 2.13-53 所示。随着建设的不断发展, PZ20、PZ30 系列终端电器必然不断地发展、完善、提高,显示出广阔美好的前景。

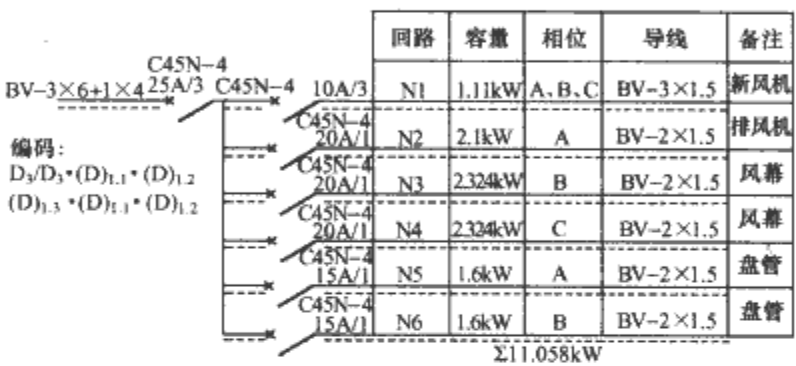


图 2.13-53 要求内带分励脱扣小断路器的组合电器线路示意图

4 终端电器的发展动向

终端电器的发展经历了 20 世纪 90 年代的快速发展,近些年来已呈平稳发展态势,几乎所有的低压电器大公司(如 SIEMENS、ABB、施耐德等)都生产终端电器的主要产品(如小型断路器、剩余电流断路器等)。还有一些专业生产终端电器的制造商如 Hager、Legrand 等,它们生产的产品系列规格齐全、技术性能指标高、尺寸模数化、安装轨道化,能满足大多数用户的需求。

4.1 小型断路器 (MCB) 的发展

作为终端电器中的主要产品,小型断路器的发展始终主导着终端电器的发展,其典型产品有施耐德公司的 C65、DPN 系列,ABB 公司的 S700、S800 系列,SIEMENS 公司的 5SP3 系列,Hager 公司的 HT 系列,Legrand 公司的 DX 系列等,这些产品的主要技术参数见表 2.13-40。

表 2.13-40 新小型断路器 (MCB) 的主要技术参数表								
制造商名称	产品型号	额定电流 (A)	额定电压 (V)	动作特性	符合标准	$I_{\Delta n}$ (kA)	极数	宽度尺寸 (1P) (mm)
施耐德	C65H	1~63	230/400 AC	C, D	GB 10963	10	1P~4P	18
	EA9AH	63~100	230/400 AC	C, D	GB10963	10	1P~4P	27
	DPNH	2~40	230, AC	C	GB 10963	10	1P+N	18
ABB	S700	10~100 (125)	230/400 AC	E, K	DIN VDE 0645	25	1P~4P	36
	S800	10~125	400/690 AC 250 DC	B, C, D, K	EN 60898-1 IEC 60947-2 UL 489	50 ($I_{\Delta n}$) 40 ($I_{\Delta s}$)	1P~4P	27
SIEMENS	5SP4	80~100 (125)	230/400 AC	B, C, D	EN 60898	10	1P~4P	27
Hager	SLS (HT)	10~100	230/400 AC	E, Cs	DIN VDE 0643	25	1P, 3P, 4P	27
Legrand	DX-H	1~125	230/400 AC	B, C	BS EN 60898	10	1P~4P	17.7/26.7

终端配电系统的选择性保护过去一直无法实现,带选择性保护的小型断路器如 ABB 公司的 S700 (见图 2.13-54) 等的诞生,彻底解决了终端配电系统上下级的选择性保护问题,使用电的安全性、可靠性大大提高。带选择性保护的小型断路器将成为小型断路器家族中待需发展的重要产品。

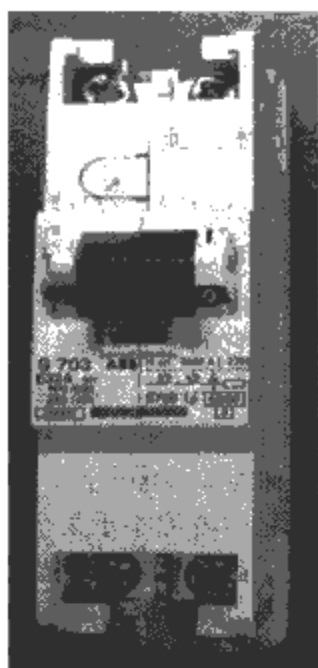


图 2.13-54 S700 主开关外形图

P+N 结构的 MCB 近些年来得到快速发展,目前 P+N 结构的 MCB 向大容量及高分断能力方向发展。随着 P+N 结构与 MCB 技术突破,更小体积(预计单极 12mm 宽)的 MCB 在不久的将来也会面世,这将迎来 MCB 又一发展高峰。

同一 MCB 具有多样的脱扣特性,可符合多种标准,满足不同配电系统的要求,适应全球化贸易的需要,如 ABB 公司的 S800,具有 B、C、D、K 等脱扣特性,符合 IEC 60898、IEC 60947-2、UL 489—2002《塑壳断路器、塑壳开关和断路器外壳》等标准。

MCB 除了自身技术发展外,其配套附件更趋齐全,欠电压、分励、电动操作、辅助触头、报警触头等附件使 MCB 的使用性能得以延伸。附件安装位置的灵活多样,也可相应减少成套安装时占用的体积。

MCB 的安装方式又有新突破,从螺钉安装到轨道安装,使 MCB 安装更方便(不用螺钉旋具也可以拆装 MCB)。目前母排连接与安装一体技术被越来越多的 MCB 所采用,在 MCB 安装于母排的同时,实现了 MCB 与进线端的连接。这一技术的应用,既减少了 MCB 成套安装所占用的体积,又能使母排连接一气呵成,提高生产效率。

4.2 剩余电流断路器 RCCB 与 RCBO 的发展

剩余电流断路器 RCCB 与 RCBO 的发展近些年来主要集中在 B 型剩余电流断路器和带自检功能的剩余电流断路器。新技术的引入和不断突破,不仅使剩余电流断路器的保护性能更完善、功能更齐全,而且体积也在不断缩小。

B 型剩余电流断路器不仅能检测交流剩余电流、脉动剩余电流,还能检测平滑直流剩余电流和缓慢变化的剩余直流电流。前些年的产品大都体积较大,目前 B 型剩余电流断路器采用了新的直流故障电流检测技术,因此体积大大缩小。如 MOELLER 公司的 4P RCCB-63A 宽度仅为 90mm (见图 2.13-55),仅为原来宽度的 60%。小体积 B 型 RCCB 的出现一方面使剩余电流保护性能更为完善,另一方面为今后更广泛应用打下了基础。

带自检功能的剩余电流断路器(见图 2.13-56)的诞生是剩余电流断路器家族中又一发展的亮点。为了保证剩余电流断路器的可靠性运行,在正常运行时要求定期操作 RCCB 的试验按钮,对 RCCB 进行检查,以确认 RCCB 的剩余电流功能是否正常,这样操作受人为主观因素影响较大。而具有自检功能的 RCCB 可以自动定期检测剩余电流,当有故障时可以发出报警信号,通知人们进行检修。这一技术的应用将极大地提高剩余电流断路器终端使用的安全性和可靠性。

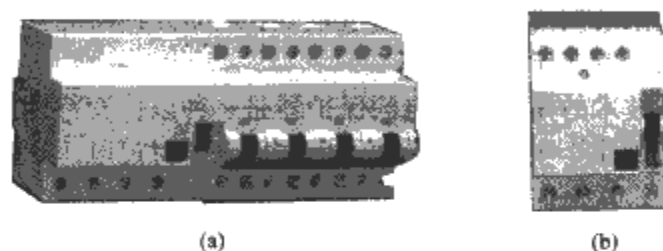


图 2.13-55 默勒公司的 B 型 RCCB 和 RCBO
(a) RCBO; (b) RCCB

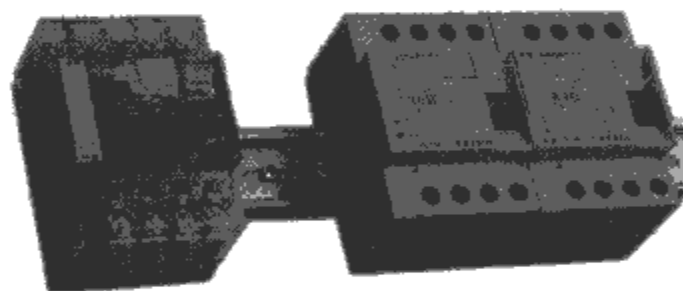


图 2.13-56 SHUPA 公司的带自检功能的剩余电流断路器

4.3 终端组合电器的发展

经过近二十年的发展,终端组合电器的防护外壳大多采用高强度工程塑料,结构新颖,外形美观,色调明快,外壳防护等级不断提高,从 IP30、IP40 发展到 IP55、IP65。模块化的外形尺寸,使它们既能单独使用,又可组合拼装使用。

终端组合电器安装与母排连接越来越多地采用轨道安装与母排连接二位一体技术,即将终端电器元件直接安装于固定在终端组合电器防护外壳上的母排上(无需安装轨),在实现安装的同时,又完成了母线连接。这一技术的发展既方便了安装连接,又可大大节省安装连接空间,简化了内部结构,将成为防护外壳的主流结构。

第14章 电涌保护器 (SPD)

1 电涌保护器概述

1.1 信息化催生的新电器——电涌保护器 (SPD)

电涌保护器是低压电器中的一个新成员，以前也称为低压避雷器。尽管低压避雷器的历史已经不短，但主要作为电子信息产品安全保护用的电涌保护器，从一般保护电器中分离出来，形成一个独立的产品分支，只有10多年的历史。电涌保护器的第一份国际技术标准 IEC 61643-1:1998《低压配电系统的电涌保护器 (SPD) 第1部分：性能要求和试验方法》发表于1998年。

从技术的角度讲，电涌保护器是一种以伏安特性为非线性的元件作为主要功能元件，用来抑制瞬时过电压，泄放电涌电流，从而保护电器和电子设备的低压保护电器。它的英文名称叫 Surge Protective Device，简称 SPD。

瞬时过电压，或者称为浪涌过电压，主要来自三个方面：雷电、电气系统操作和静电，其中雷电是最主要的。

据统计，地球上平均每秒钟发生100次左右的雷击放电。这种放电将在以雷击点为中心的大约2km范围内的电力线和通信信号线上，产生足够高的浪涌电压，它侵入到连接在这些线路上的计算机等信息技术设备和各种电气电子设备上，造成以下三种破坏效果：①干扰设备的正常工作，造成数据丢失或发生工作差错，或使设备暂时丧失正常功能；②使某些元器件性能劣化，寿命减低；③造成某些元器件永久性破坏。严重时，这类干扰和损坏可能导致整个系统工作瘫痪，由此带来的间接损失和连带损失，常常是十分巨大的。例如，1972年8月，山东境内一次雷击，京沪铁路线十多个车站信号设备受损，造成京沪全线瘫痪。据统计，我国1998~2001年的56次重大雷电灾害（单次直接经济损失超过100万元者）共计直接经济损失14409.8万元，平均每次257.3万元。据统计，美国排名前1000名的企业因雷击造成的损失，高达一年2亿美元，平均每个企业20万美元。德国一家重要的电子保险公司报道说，因雷电和操作过电压造成的损失理赔，在1984年占理赔总数的8.5%，到1994年上升到35.5%，也就是说十年中翻了两番。这些统计数字的背后反映了这样一些现实：

(1) 现代信息技术产品的基础是集成电路芯片，在芯片集成度越来越高，功能越来越强大的同时，微电子元件的尺寸越来越细微，结果导致它耐受浪涌电流/电压的能力越来越低，对电冲击更加敏感。

(2) 随着人类社会的日趋信息化，信息技术产品快速渗透到国民经济、国防安全和人民生活的各个方面，产品的数量快速增加，因此浪涌电流/电压导致的损坏事件也呈快速上升的趋势。

(3) 信息和网络产品是现代社会的“大脑和神经”，它们的故障所带来的经济的、政治的、军事的损失往往是很大的。

中国是世界上雷电灾害严重的国家，因此政府对防雷减灾高度重视，许多省已强制规定在一些场所或设施必须安装防雷装置，因此中国也是世界上防雷产业发展最快的

国家之一。

1.2 电涌保护器的基本功能

SPD 是利用电压/电流特性 (U/I 特性) 为电压限制特性的元件来完成抑制瞬时过电压，泄放浪涌电流这样的保护功能的。所谓电压限制特性是这样一种特性：当该元件两端电压低于它的阈值时，它的阻抗极高（几兆欧或更高），只有很小的漏电流流过，实际上处于截止状态；但当电压超过它的阈值时，它的阻抗迅速下降，可小到欧姆级或更小，处于充分导通状态，从而泄放浪涌电流；导通后只要外加电压低于其阈值，或流过它的电流小于某个“维持电流”，元件便快速恢复到高阻截止状态。这种阻抗变化有单调变化和突跳变化两种不同的形式，因此电压限制特性元件可进一步区分为钳位型和开关型两种不同类型，如图 2.14-1 所示。

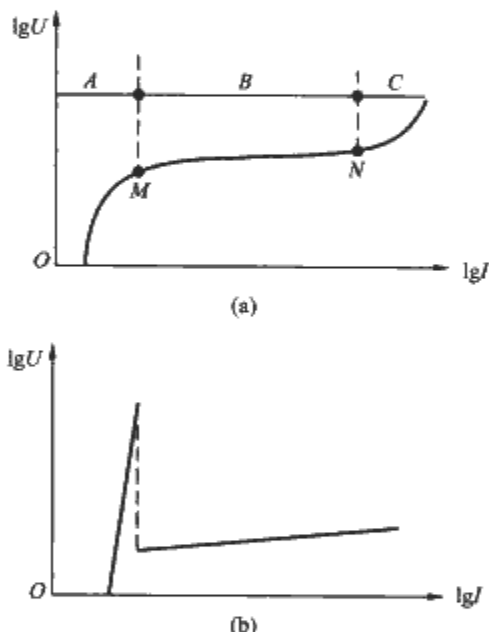


图 2.14-1 电压限制特性元件的 U/I 特性
(a) 钳位型电压限制特性；(b) 开关型电压限制特性

用非线性元件实现的 SPD 的保护功能，可用图 2.14-2 所示的例子来说明。这里假定它用的是具有钳位特性的 SPD。图 2.14-2 表示了用 SPD 抑制雷电过电压，分流雷击产生的浪涌电流，保护计算机 (PC) 的一个例子。图中 220V 供电线 L_0 在 A 点进入室内，经过一段 L_s 线后在 B 点送到计算机 (PC)。在 B 点，两根电源线的每一根上都对地接了一只用压敏电阻构成的 SPD。它们在 220V 交流峰值电

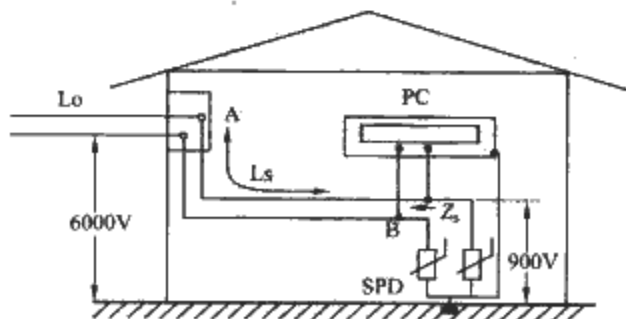


图 2.14-2 SPD 的保护功能

压 ($220\text{V}\times 1.41=310\text{V}$) 下的漏电流, 假定为 $2\mu\text{A}$, 则它们的对地阻抗相当于 $310\text{V}/2\mu\text{A}=155\text{M}\Omega$, 这时 SPD 呈“关断”状态。如果附近发生雷击放电时, 在电源线的入口点 A, 对地有 6000V 的瞬时过电压。室内线路 L_s 对这种瞬时冲击的阻抗 Z_s 假定为 3.5Ω , 由于压敏电阻在大电流下的阻抗比 3.5Ω 小得多, 因此 A 点对地会有大约 $6000\text{V}/3.5\Omega=1714\text{A}$ 的电流, 这个电流通过 SPD 入地。B 点的对地电压由压敏电阻的特性所决定, 假定为 900V , 只要 PC 机的冲击耐压水平高于 900V , 就不会因这样的雷击而损坏。(图 2.14-2 仅用作原理说明, 而不是实用电路)

图 2.14-2 所示的例子说明, 一个采用 SPD 的过电压保护系统, 实际上包含了三个基本环节: 过电压源、保护器件和被保护对象, 如图 2.14-3 所示。保护器件 SPD 是这个系统的中间环节, 它的上游是过电压源, 下游是被保护对象。表征过电压源的基本参数是瞬时过电压 (或浪涌电流) 的峰值、波形、出现频度, 以及对 SPD 呈现的源阻抗等。表征被保护对象的基本参数是冲击耐受电压或冲击抗扰度。SPD 的任务是在规定的安装现场和规定的工作寿命期内, 保证出现在被保护对象上的冲击都小于被保护对象允许的冲击耐受电压或冲击抗扰度, 且 SPD 本身能耐受住过电压/电流的应力而不损坏。考察 SPD 时, 都应把它放在这样一个系统中来讨论。



图 2.14-3 采用 SPD 的过电压保护系统的三个基本环节

外部浪涌过电压侵入一台电气/电子设备的途径主要有四个: ①从该设备的电源线进入; ②从该设备的信号和数据线侵入; ③从设备的接地线进入; ④空间电磁场透过设备外壳侵入设备内部, 在设备中产生感应电压。SPD 通常设置在电源线入口和信号数据线入口, 因此可将 SPD 区分为电源保护用 SPD 和通信信号网络保护用 SPD (为简单起见, 下面分别称为“电源用 SPD”和“信号用 SPD”)。

1.3 SPD 的产品特点

SPD 有以下几个特点是值得注意的:

(1) 与电力避雷器相比, SPD 有两个显著的特点: ①在运行中 SPD 的导通频度远高于避雷器, 其原因是电力线和通信线上的浪涌电压 U_p 出现的概率 P 有如下的规律

$$P = cU_p^{-n} \tag{2.14-1}$$

式中 c 是个常数, 指数 n 的值在 $1\sim 4$ 之间, 随着具体系统和地点的不同而不同。也就是说, 浪涌电压的发生概率, 随着电压值的降低而激增, 因此低电压的 SPD 在运行中的导通频度远高于高电压的避雷器。②SPD 的保护对象大多是对浪涌很敏感的电子电气产品; 而避雷器的保护对象是电力线路和变压器、电机等电工设备, 它们耐浪涌过电压的能力要强得多。

(2) SPD 只是综合防雷措施中的一个环节, 也就是说 SPD 的防雷保护效果, 不仅仅取决于它本身, 还在很大的程度上受着其他措施正确与否的影响。防雷措施是包括“D—B—S—E”四个方面的综合技术措施, 这四个方面是分流 (Dividing)、均压 (Bonding)、接地 (Earthing) 和屏蔽 (Shielding)。SPD 只是综合技术措施中的一项。

(3) SPD 技术是多学科的边缘技术, 从图 2.14-3 可以看出, 它既要与冲击源 (雷电过电压、操作过电压) 配合, 又要与被保护对象配合, 因此 SPD 技术工作者要尽可能地掌握与 SPD 的接入点相关的知识。

(4) SPD 产品正处在迅速发展、日趋成熟的成长期, 一方面产品的品种和社会需求量快速增长, 另一方面还有许多课题在业界存在着较大争议, 有待解决, 随着这些问题的解决和技术性能的提高, 产品技术规范也在不断更新。

2 SPD 的主要功能元件

SPD 的功能元件, 按其功能可区分为电压限制元件和电流限制元件两大类。电压限制元件与被保护对象并联, 用来抑制出现在被保护对象上的过电压; 电流限制元件与被保护对象串联/并联, 用来切断、限制或分流涌入被保护对象的电流。每一个 SPD 中至少有一只电压限制元件, 而电流限制元件只在一部分 SPD 中才用到, 大多数电源用 SPD 内部没有电流限制元件。这两种功能元件都包含有几个不同的品种, 它们的工作原理不同, 特性不同, 各有优缺点。SPD 用电压限制元件的种类如图 2.14-4 所示。

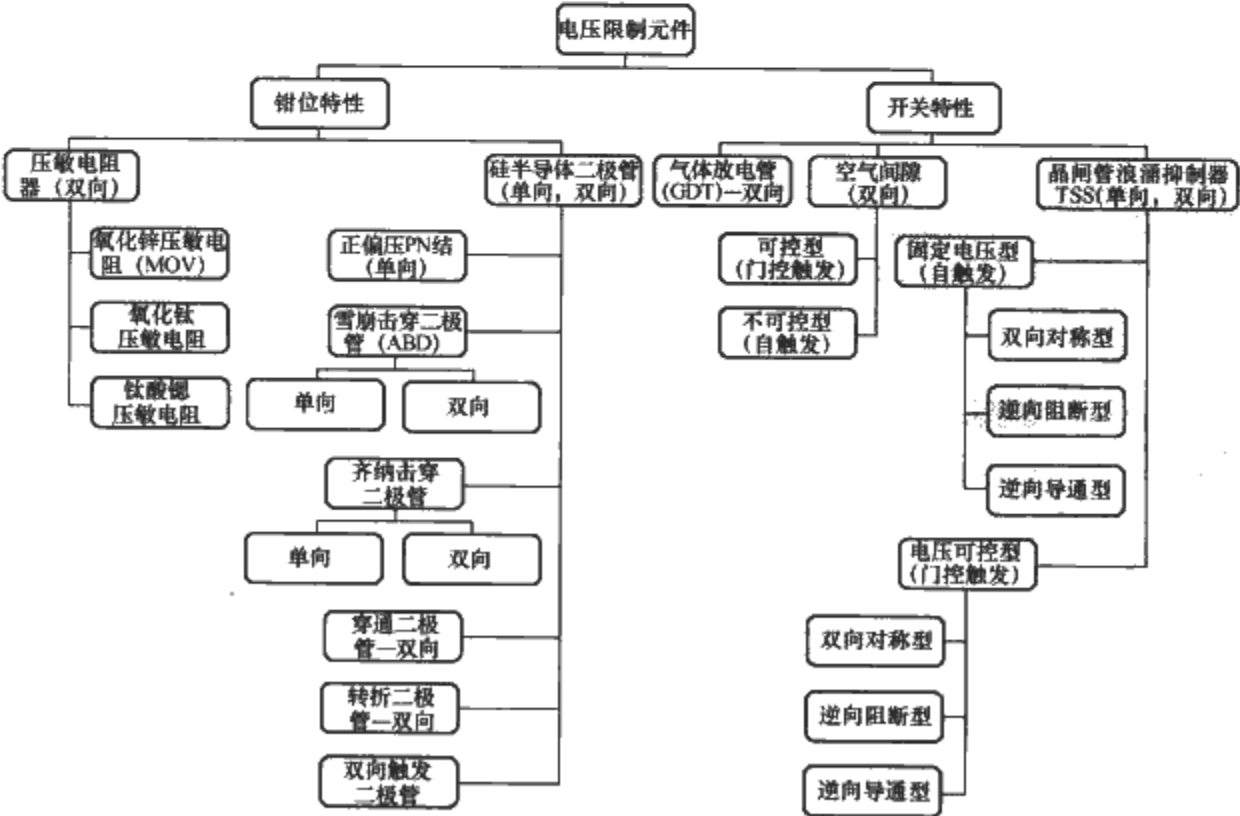


图 2.14-4 SPD 用电压限制元件的种类

图 2.14-4 所示的各种元件不只是用于 SPD, 在其他方面也有广泛的应用, 当它们被用于 SPD 时, 需要对它们的 SPD 所要求的性能参数作特别要求, 而对于与 SPD 应用无关的项目则可不作要求。现在 IEC 61643 系列标准已对 SPD 中使用较多的四种元件——MOV (氧化锌压敏电阻器), GDT (气体放电管), ABD (雪崩击穿二极管) 和 TSS (晶闸管浪涌抑制器) 制定了专门的 SPD 用元件技术规范。其中钳位特性的压敏电阻器和开关特性的气体放电管使用最多。

2.1 压敏电阻器 (MOV)

压敏电阻器, 是指在一定电流电压范围内, 电阻值随电压而变, 或者说是电阻值对电压敏感的电阻器。在技术文件里, 它的英文名称有三个: “Varistor” (Variable Resistor 的合成词)、“Voltage Dependent Resistor” (简称为 VDR) 和 “Voltage Sensitive Resistor”。

现行压敏电阻器的主导品种是以氧化锌为主体材料的氧化锌压敏电阻器, 因为氧化锌是一种金属氧化物, 故也称为金属氧化物压敏电阻器 (Metal Oxide Varistor, 简称为 MOV)。用作 SPD 元件的 MOV 的技术标准是 IEC 61643-331 《低压电涌保护装置用元件 第 331 部分: 金属氧化物压敏电阻器规范》。

2.1.1 MOV 的结构和工作原理

MOV 是一种用陶瓷工艺生产的化合物半导体元件, 它的基本结构如图 2.14-5 所示。生产企业对外供货的产品形式主要有四种: 带银电极裸片, 焊接了金属引出端的电阻片, 带绝缘封装层 (环氧树脂、有机硅漆等) 的压敏电阻器, 装入塑料外壳中的压敏电阻器。

MOV 的钳位型伏安特性, 是由它的内部微观结构所产生的。这种元件以氧化锌 (ZnO) 为基料, 加入氧化铋等多种 (一般 5~10 种) 微量添加剂, 制成陶瓷体, 然后在陶瓷体的两面烧渗银浆电极, 再在银电极上焊接引出线 (片), 最后进行绝缘封装而成。

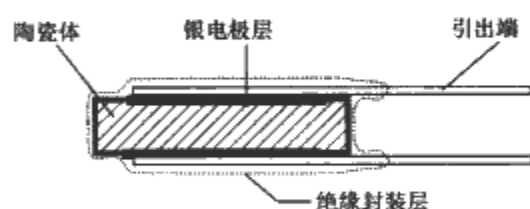


图 2.14-5 MOV 的基本结构

陶瓷体是由许多粒径为几微米到几十微米的 ZnO 晶粒构成的集合体, 多个晶粒的交汇处有在高温烧成中形成的多种绝缘化合物。这种结构可用图 2.14-6 所示的模型来表示。

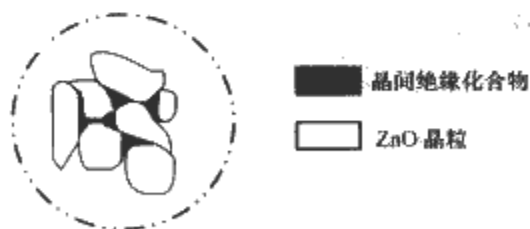


图 2.14-6 MOV 陶瓷体内部结构模型

ZnO 晶粒是低电阻率 ($0.01\Omega \cdot m$ 左右) 的导体, 相邻两个紧密接触的 ZnO 晶粒间有一个厚度为 30~50nm 的过渡层, 它的电阻率极高, 且与两侧的 ZnO 晶粒之间形成对自由电子运动起阻挡作用的肖脱基势垒。实际测量得到的势垒电压在 2~3.5V 之间。所以一对互相接触的晶粒就相当于

一对“背对背”串联的电压为 2~3.5V 的齐纳二极管, 就是一个 MOV 单元。一只 MOV 陶瓷体, 实际上是许多串/并联的 MOV 单元所构成的网络。

因此可推论出 MOV 的以下特性:

(1) MOV 两电极之间串联的单元数, 以及总势垒电压, 大体上与陶瓷体厚度成正比, 而与晶粒尺寸成反比。

(2) MOV 两电极的相对面积越大, 并联单元数就越多, 承受冲击电流的能力就越大。

(3) MOV 的电压大体上与厚度成正比, 承受冲击电流的能力大体上与面积成正比, 那么它承受功率和能量的能力就大体上与电阻体的体积成正比了。

(4) ZnO 晶粒尺寸越大, 每个单元的热容量就越大, 承受功率和能量的能力就越大。

(5) MOV 的制造水平体现在内部晶粒的“匀质化”程度上, 每个晶粒的几何尺寸、形状、化学成分和物理特性的一致性, “健全的”单元数多, 则电流在电阻体内的分布就均匀, 承受电流、功率和能量的能力就大。

(6) 在硅单晶半导体器件中, 电压和电功率集中在 PN 结区, 而在 MOV 中, 势垒层散布在整个电阻体中, 这就是压敏电阻器能承受比硅单晶器件大得多的冲击电流和能量的内在原因。

2.1.2 MOV 的伏安特性和等效电路

MOV 的伏安特性可以划分为 A、B、C 三个不同的特征区段 [如图 2.14-1 (a) 所示]。电流很小的 A 区和电流很大的 C 区的共同点是, 电压与电流的变化接近线性关系; 而 B 区的特点是, 电流在很大范围内变化时, 相应的电压变化很小, 这就是所谓的高非线性。通常把 A、B、C 三个区段分别称为漏电流区、高非线性区和上升区。三个区段的分界点 M 和 N 不是很明确, 为方便起见, 通常把 M 点的电流规定为 1mA, 也就是说把 1mA 点视为 MOV 截止与导通两种状态之间的转换点, 而把这一点的电压则称作直流参考电压或压敏电压。N 点的物理意义是 MOV 的电阻值已不随电流的增大而进一步减小, 而是趋近于一个最小值 (如图 2.14-7 所示的电阻体电阻 R_b), 这一点大体在电流密度为 $(3\sim4)\times 10^7 A/m^2$ 的部位。MOV 在电路中的行为可以用图 2.14-7 所示的等效电路来描述。

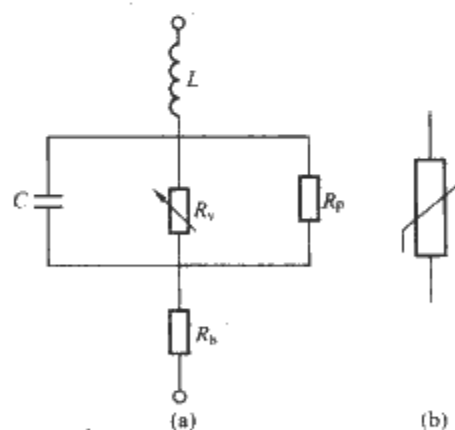


图 2.14-7 MOV 的等效电路和电路符号

(a) 等效电路; (b) 电路符号

L —等效串联电感 (主要是引线电感); C —固有电容量 (在几到几千皮法之间); R_p —漏电阻 (一般在几百兆欧以上); R_v —非线性电阻 (随着电流的增大 R_v 从无限大减小到零); R_b —电阻体的线性电阻 (大体在几十到几百毫欧)

2.1.3 MOV 的电性能和参数

与其他元器件一样, MOV 的性能参数可区分为特性值和额定值两种类型。特性值是可以直接测量得到的参数值;

额定值是指 MOV 的极限能力或极限条件, 超出这些极限, 就可能引起损坏, 额定值的符合性要透过一定的试验程序来验证。为叙述方便, 这里把 MOV 的电性能参数划分为四个方面: 常规性能、保护性能、系统电压耐受性和冲击电流耐受性。

2.1.3.1 常规性能

MOV 的常规性能是指在生产和检验中经常测量的直流和交流参数, 主要有压敏电压 U_n 、电压非线性指数 α 、漏电流、电容量 C_0 四项。

(1) 压敏电压 (直流参考电压) U_n 。压敏电压 U_n 是以规定测试电流 (DC, 1mA) 测得的电压值, 也称为直流参考电压。它是 MOV 的重要参数, MOV 的许多试验都以 U_n 的变化率作为是否合格的判据, MOV 的其他电压参数也往往以相对于 U_n 的比例来表示。例如, 以加压比 R_{ap} 来衡量 MOV 上电压应力的大小, R_{ap} 也称为荷电率, 它等于施加在 MOV 上的交流电压峰值或直流电压值对于 U_n 的比值; 以限压比 R_{cl} 来衡量 MOV 抑制浪涌过电压的性能, R_{cl} 等于 MOV 的限制电压对于 U_n 的比值。

(2) 电压非线性指数 α 。在高非线性区, MOV 的电流 (I)、电压 (U) 关系通常用下面的试验方程来近似地描述

$$I = KU^\alpha \quad (\alpha > 1) \quad (2.14-2)$$

式中: K 为产品型号规格决定的常数。

由式 (2.14-2) 可写出

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^\alpha \quad (2.14-3)$$

式 (2.14-3) 中的 α 称为压敏电阻的电压非线性指数, 它的物理意义是, 伏安特性上某一点的静态电阻 (U/I) 是动态电阻 (微变电阻 dU/dI) 的倍数。MOV 的 α 是随着它的电流密度而变的, 大体在 $0.1 \sim 10 \text{ A/m}^2$ 范围内最大。 α 大, 限压性好, 但耐受工频暂时过电压 (TOV) 的能力差, 因此希望 TOV 区段的 α 不要太大。

(3) 漏电流。漏电流是判断和控制 MOV 质量的重要参数, 根据测试目的的不同, 采用不同的测试电压, 得到不同的漏电流值。

在 MOV 的生产中, 一般用 $0.75U_n$ 的直流电压来测量漏电流, 这就避免了同一批产品中每只产品实际压敏电压值的不同对漏电流测试结果的影响。大多工业上生产的 MOV 的漏电流在 $20\mu\text{A}$ 以下。

连接在工频交流电源的相线和地之间的 MOV 应控制其交流漏电流, 因为这个漏电流太大会引起连接在上游线路的漏电保护开关误动作。

在 MOV 的交流电压老化试验中, 测量最大持续交流电压 U_{ac} 下漏电流的电阻性分量 I_r , 因为在 MOV 的使用寿命期内, 漏电流的电容性分量 I_c 基本不变, 但 I_r 则随着 MOV 陶瓷体的老化而增大。刚投入使用的 MOV, 主要是电容性电流, 而接近寿终时, 电阻性漏电流成为主要成分。所以, 在 MOV 的使用过程中, 通过监测其漏电流的电阻性分量 (或功率损耗), 可判断其老化程度, 决定是否要予以更换。MOV 的漏电流是个对温度敏感的量。温度越高漏电流越大, 而且漏电流越小对温度越敏感。就 MOV 的质量而言, 并非漏电流越小越好, 漏电流的稳定性比它的初始绝对值更重要。

(4) 电容量 C_0 。从图 2.14-5 所示的 MOV 的基本结构来看, 它相当于一只电容器, 其电容量随着规格的不同, 大体为几皮法到数千皮法。在这里要注意, 与普通电容器不同, MOV 的 C_0 并不随其厚度的增大而减小, 而是与压敏

电压 U_n 成反比, 即

$$C_0 = KS/U_n \quad (2.14-4)$$

式中: S 为电极面积; K 为由瓷料配方和生产工艺决定的常数。

可见, 在电极面积、瓷料配方、生产工艺一定的条件下, 压敏电压越高, 电容量 C_0 就越小。所以, 两只 U_n 一样, 但厚度不同的 MOV, 它们的 C_0 基本上一样。

2.1.3.2 保护性能——限制电压和限压比

MOV 的保护性能, 即它抑制浪涌过电压的能力, 是 MOV 最重要的使用性能, 限制电压 U_{cl} 或限压比 R_{cl} 是表示这一性能的主要参数。 U_{cl} 是在规定的测试条件下, 当规定波形和峰值的测试电流 I_x 流入 MOV 时, 它两端电压的最大峰值。 R_{cl} 等于限制电压与压敏电压之比, $R_{cl} = U_{cl}/U_n$ 。

在规定电流下 MOV 的 R_{cl} 值主要取决于以下三个因素: 限压比 R_{cl} 随着测试电流波上升速率 (di/dt) 的增大而增大; R_{cl} 随着流过 MOV 的电流密度 (A/m^2) 的增大而增大; MOV 的瓷料配方和制造工艺对限压比 R_{cl} 有重要影响。

在 MOV 的生产和验收时, 一般只测量某个规定电流值下的限制电压 U_{cl} , 常用的规定有以下三种:

(1) 以波形为 8/20, 电流密度大约为 $6 \times 10^4 \text{ A/m}^2$ (当 $U_n \leq 68 \text{ V}$ 时) 或 $3 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ (当 $U_n > 68 \text{ V}$ 时) 的测试电流进行测量。

(2) 以波形为 8/20 的标称放电电流 (电流密度大约为 $2 \times 10^7 \text{ A/m}^2$) 进行测量 (IEC 61643-1)。

(3) 以规定大小的 1.2/50-8/20 组合波, 叠加在最大持续交流电压 U_{ac} 的峰点上进行测量 (UL 1449—1996《暂态电压冲击抑制器》)。

在实际使用中往往要知道某个电流范围内的 R_{cl} 或 U_{cl} , 因此 MOV 的制造商通常给出最大放电电流以下的全部电流范围内的 $R_{cl}-I_p$ 曲线或 $U_{cl}-I_p$ 曲线。图 2.14-9 是这种曲线的一个例子。

2.1.3.3 系统电压耐受性能

MOV 的基本应用方式是与被保护对象并联, 因此它承受着与保护对象同样的工作电压 (下面称这个电压为系统电压)。对系统电压应当考虑三个数值: 名义值、电源电压正偏差、故障条件下的暂时过电压 (TOV)。MOV 的与系统电压的这三个数值相关的性能参数有最大持续工作电压 MCOV (交流或直流)、电压寿命、伏秒特性和工频电流耐受性。

(1) 最大持续工作电压 (MCOV)。MCOV 是可以长期连续施加在 MOV 上的最大工频电压有效值 (U_c), 或直流电压值。它是通过电压寿命试验和动作负载试验来验证的。

(2) 电压寿命。压敏电阻器在规定的上限环境温度和最大持续工作电压下, 应具有所要求的期望寿命, 例如 10、20 年等。一批产品是否具有期望的寿命年限, 可用加速寿命试验来验证。

(3) 伏秒特性。伏秒特性 (U_r-t 或 R_r-t) 是在规定环境温度下, 加在 MOV 上的高于 U_c 值的电压 U_r (有效值), 与 MOV 能保持热稳定的加电压时间 t 的关系曲线。也可把电压 U_r 表示成电压比, $R_r = U_r/U_c$ 。该特性对于在应用中判断 MOV 在过电压条件下的工作稳定性是十分重要的。

(4) 工频电流耐受性。SPD 技术标准都要求考核 MOV 在工频电流数毫安到数安条件下的耐受性, 但具体试验方法尚不统一。

2.1.3.4 冲击电流耐受性

经冲击电流作用后, MOV 的内部结构和宏观性能会发

生一定的变化,这种变化随着冲击强度由小到大表现为性能参数的可恢复性变化、性能参数的劣化(不可恢复性变化)和结构性破坏三种形式。

用于考核 SPD 用 MOV 冲击电流耐受性的冲击电流主要有 8/20μs 电流波、SPD 的 I 级试验电流,1.2/50-8/20 组合波和 2ms 方波。有的使用场合还要求用 100kHz 振铃波、5kHz 振铃波、工频半波进行试验。表征冲击电流耐受性的性能参数主要有单次冲击最大电流、重复冲击电流减额特性、单次冲击最大能量、最大平均功率和通流容量(安秒资源)。至于电源用 SPD 所要求的 I 级试验电流、II 级试验最大放电电流,标称放电电流、III 级试验组合波,将在 SPD 中进行讨论。

(1) 单次冲击最大电流。单次冲击最大电流即 MOV 能承受的 8/20μs 电流冲击一次的最大电流峰值。能承受的判据是冲击后 U_n 的变化不大于 10%。

(2) 单次冲击最大能量。单次冲击最大能量即 MOV 能承受的 2ms 方波电流冲击一次的最大能量值。能承受的判据是冲击后 U_n 的变化不大于 10%。

(3) 最大平均功率。最大平均功率即当 MOV 遭受连续脉冲作用时,它的平均功率的允许最大值。

(4) 重复冲击电流减额特性。电流峰值减额特性 $I_p = f(\tau, n)$ 表示 MOV 能够承受的冲击电流峰值 I_p 与独立冲击次数 n 和冲击电流的等效方波时间宽度 τ 三者之间的关系。这里能承受的判据也是冲击后 U_n 的变化不大于 10%。独立冲击是指相邻冲击的间隔时间足够长,各次冲击之间无热累积效应。有了这个关系,只要知道其中的两个参数,就可以确定第三个参数。图 2.14-8 是这种特性的一个例子,图中纵坐标是电流峰值的对数,横坐标是脉冲时间宽度的对数,曲线参数是冲击次数 n ,这个 n 指的是一批产品的统计平均值。

也可以把这个特性的纵坐标(电流峰值 I_p)表示成相对值电流减额系数,即以最大峰值(20μs, 1 次的 I_p)为 1,其余峰值表示成它的分数。

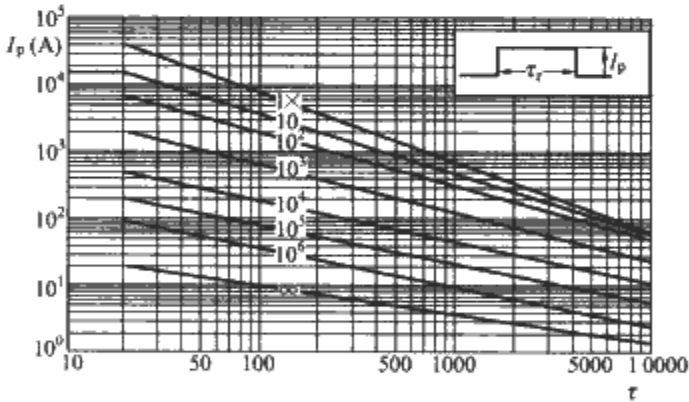


图 2.14-8 重复冲击电流减额特性
 $I_p = f(\tau, n)$ 一例

(5) 通流容量(安秒资源)。图 2.14-8 所表示的 $I_p = f(\tau, n)$ 特性,在 τ 值的一个不大的范围内,近视为一组平行直线,于是可以用下面的方程式来表达

$$\left. \begin{aligned} \lg I_p + a \lg \tau + b \lg n &= C \\ \lg(I_p \tau^a n^b) &= C \end{aligned} \right\} \quad (2.14-5)$$

式中: a 、 b 和 C 是三个常数。

式(2.14-5)的两个式子是同一方程式的两种不同的写法。从这个方程可以看出,常数 C 的量纲是电流(I_p)和时间宽度(τ)的乘积,即安秒值,实际上它表示在规定的寿终判据条件下(例如压敏电压下降 10%),MOV 在其整个寿命期内所具有的通流容量的安秒数(As),或者说安秒资源,其值为

$$As = 10^C \quad (2.14-6)$$

式(2.14-6)中的 C 值由式(2.14-5)决定。知道一批 MOV 的安秒资源值,就可以估算出 MOV 的冲击电流寿命。可以认为,在 MOV 的工作过程中,这个安秒数消耗完后,它的寿命就终止了。但要注意,这个安秒数并不等于浪涌电流的实际安秒数的累加,因为通流容量方程中的指数 a 和 b 都不等于 1。

为得出一批 MOV 的实际安秒资源值,可以从该批产品中抽出三组样品进行冲击试验,依据试验数据和式(2.14-5)求出 a 、 b 和 C 三个常数,然后利用式(2.14-6)计算出安秒资源值。利用式(2.14-6),还可进行不同波形电流之间的等效变换。

2.1.4 MOV 的失效模式

MOV 的失效模式可归结为以下五种:

(1) 劣化失效模式。MOV 的压敏电压相对于初始值的下降,超过了规定百分数(一般规定 10%)。

(2) 短路失效模式。MOV 在故障过程中呈短路状态,故障后的电压非线性指数 $\alpha < 2$ 。

(3) 高限制电压失效模式。MOV 的限制电压,高于试验前的 110%。

(4) 漏电流爬升(热不稳定)失效模式。MOV 的直流漏电流,或在最大持续交流电压 U_{ac} 下的阻性电流,或功耗值,持续增大,向热不稳定方向发展。

(5) 突然毁坏失效模式。在这一模式中 MOV 突发性地完全失效。突发性是指无法通过事先检查或监测来预测,完全失效是指器件彻底丧失所有基本的功能。突然毁坏失效通常是过强的电压/电流应力,或器件有缺陷而造成的结构性破坏,导致突然失去所有基本的功能。

2.1.5 SPD 用 MOV 的典型参数

CJV 型 MOV 的典型参数见表 2.14-1。

表 2.14-1		CJV 型 MOV 的典型参数							
电阻体名义直径 d_o (mm)	14	20	25	32	34	40	50	60	80
最大平均功率 P_m (W)	0.6	1.0	1.2	1.2	1.4	1.4	1.5	1.6	2.0
标称放电电流 I_n (kA)	3	6	10	12.5	20	20	32	40	50
最大放电电流 I_{max} (kA)	7	12.5	25	30	50	50	65	80	100
I 级试验冲击电流 (kA)	0.85	1.5	3	3.5	6	6	9	12.5	15
组合波 5000 次 U_{oc} (kV)	1, 2	2	4	4, 5	8	8	12	16	20

注 1. 标称放电电流 I_n , 最大放电电流 I_{max} 的波形为 8/20。
2. 压敏电压 $U_n = 200 \sim 1200V$, 最大持续交流电压 $U_{ac} \approx 0.62U_n$ (取整数值), 最大持续直流电压 $U_{dc} \approx 0.82U_n$ (取整数值), 限制电压 $U_{da} \approx R_{da}U_n$ (R_{da} 见图 2.14-9)。

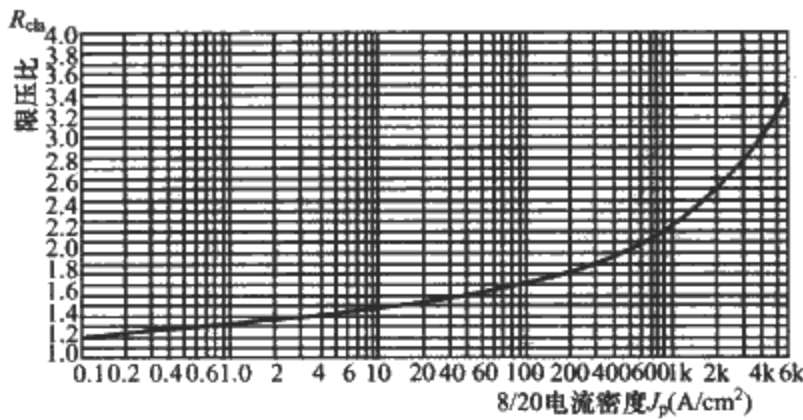


图 2.14-9 CJV 系列 MOV 的限压比
 R_{cla} —电流密度 J_p 曲线

2.1.6 SPD 用 MOV 的选用

SPD 用 MOV 的选用，就是依据 SPD 的要求确定 MOV 电阻片的名义直径 d_0 ，压敏电压下限 U_{nL} 和上限 U_{nH} 等三个主要参数。SPD 的要求应明确：最大放电电流 I_{max} ，系统标称交流电压 U_0 ，最大持续工作电压 U_c ，TOV 耐受能力，以及保护水平 U_p 和衡量 U_p 的测试电流 I_p 。选用 MOV 的计算可按以下步骤进行：

- (1) 依据 I_{max} ，参照表 2.14-1 确定 MOV 电阻片的名义直径 d_0 。若一个电阻片不能满足 I_{max} ，可用 N 片并联。
- (2) 计算 MOV 电阻片总的通流面积 $A=0.785Nd_0^2$ 。
- (3) 计算测试限制电压时的电流密度 $J_p=I_p/A$ 。
- (4) 依据 J_p 从图 2.14-9 查出 MOV 相应的限压比 R_{cla} 。
- (5) 计算 MOV 的压敏电压上限值 $U_{nH} \leq 0.9U_p/R_{cla}$ (系数 0.9 是为了确保 MOV 的限制电压不会大于保护水平 U_p)。
- (6) 计算 MOV 的压敏电压下限值 $U_{nL} \geq 1.41U_c$ 。
- (7) 依据计算得到的 U_{nH} 和 U_{nL} ，在综合考虑限制电压、电压寿命和 TOV 耐受性，以及生产的可能性等因素的基础上最后确定 MOV 压敏电压的范围。

2.2 气体放电管 (GDT)

气体放电管 (Gas Discharge Tube, GDT) 是一种伏安特性为正反向对称的开关特性器件。用作 SPD 元件的 GDT 的技术标准是 IEC 61643-311 《低压浪涌保护装置的元件 第 311 部分：气体放电管 (GDT) 规范》。

2.2.1 GDT 的结构和工作原理

GDT 有二极管和三极管两个品种，每个品种又有带引线和无引线两种形式。GDT 的内部结构和电路符号如图 2.14-10 所示。

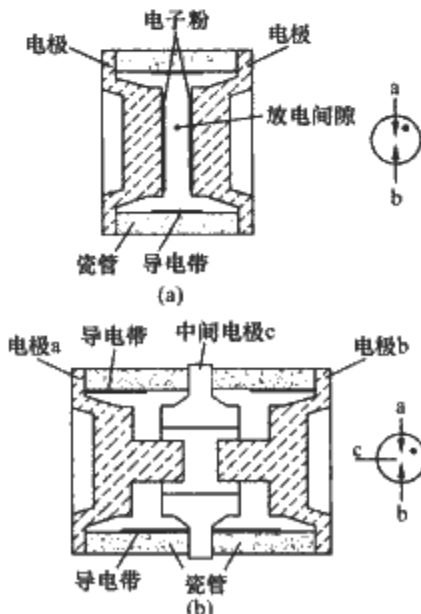


图 2.14-10 GDT 的内部结构和电路符号
(a) 二极管；(b) 三极管

从图 2.14-10 可以看出，GDT 的基本结构是在圆筒形的陶瓷外壳两端固定金属电极，方法是先将陶瓷外壳的端面金属化，然后与电极焊接，形成一个密封的圆筒，其中充有氖/氩气体，两电极之间保持一定间距，形成一个间隙。GDT 就是利用充气 (非空气) 间隙的电压击穿特性来工作的。

气体介质的电压击穿特性是服从如图 2.14-11 所示的珀那 (F. Paschen) 曲线的，图中，纵坐标是击穿电压，横坐标是气体压力和电极间距的乘积。电极间距一般小于 1mm，通过改变这个间距，改变充入的气体的种类和压力，以及电极的尺寸等，可以做成不同规格的 GDT。此外，在 GDT 电极的相对端面上还涂有激活化合物，以促使击穿导通时的电子发射，在陶瓷圆筒的内表面上涂复有导电带，用来改变电场分布，加快气体放电和提高放电参数的重复性。

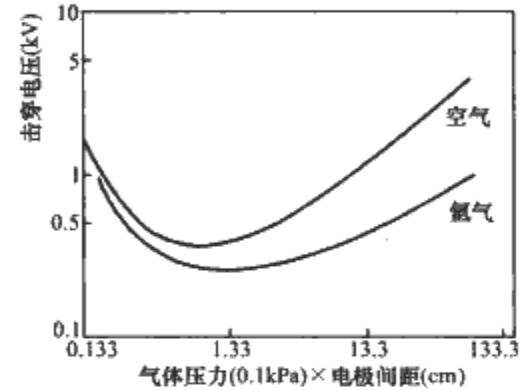


图 2.14-11 珀那 (F. Paschen) 曲线

图 2.14-12 表示 GDT 的伏安特性，以及它对正弦交流电压的响应。GDT 具有正/反向对称的伏安特性，图 2.14-12 中只画出了它的正向伏安特性。下面对它作简要说明：当 GDT 上的电压从零上升到 U_1 以前，电流为零。当电压达到击穿电压 U_1 时，气体击穿导电，外电路阻抗上有电压降，GDT 上的电压由 a 点跌落到 b 点，GDT 进入辉光放电区 (图中的 bc 段)。在辉光放电区，随着电流的增大，GDT 上的电压略有上升。当上升到 c 点即电流增大到 i_1 时，GDT 中的气体由辉光放电区突跳到弧光放电区 (由 c 点跳变到 d 点)。辉光放电的最高点电压 (c 点的电压) 随着产品型号规格的不同大体在 70~150V。弧光放电区 (图中的 de 段) 的电压值很低 (10~35V)，而电流相当大，其等效电阻一般在毫欧级。因此弧光放电区的电流实际上取决于电源电压和源阻抗。进入弧光放电状态后，若外电压降低，流过 GDT 的电流减小 (e 点到 f 点)。当减小到维持弧光放电所需的最小电流 i_3 (其值随着具体型号规格的不同，为 10~100mA) 时，弧光放电转变到辉光放电，电压突升 (由 f 点突升到 g 点)。随着辉光放电的进一步减弱，当达到熄弧电压 U_4 时熄灭，GDT 恢复为高电阻状态。

最后要说明的一点是，以前生产的 GDT 中放有微量的放射性物质，目的是使 GDT 中的气体预电离。现在的产品中大多没有了，对于含有放射性物质的产品，它的存放、使用和废旧处理应符合专门的规定。

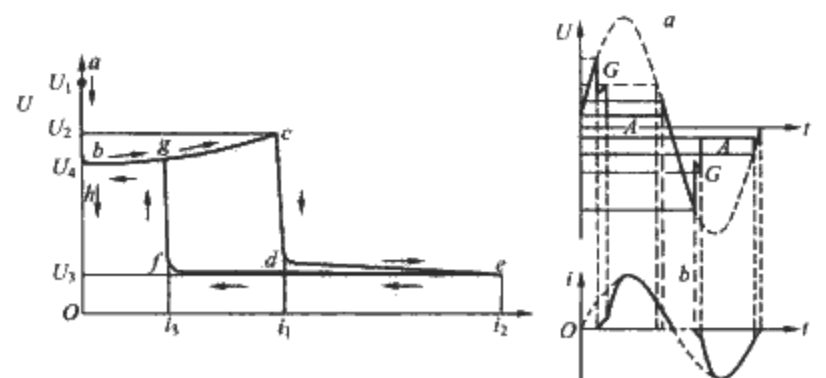


图 2.14-12 GDT 的伏安特性和对正弦电压的响应

2.2.2 GDT 的电性能参数

(1) 直流击穿电压 U_{sd} 。即以上升速率为 $100 \times (1 \pm 10\%)$ V/s 的斜升电压测得的 GDT 的击穿电压。直流击穿电压的名义值 U_{sdn} 一般在 70~1000V 之间, 特殊定货的可做到 4000V 或更高。GDT 击穿电压的实测值由于受多种因素的影响, 测试结果的离散性较大, 因此它的容差一般为 $\pm 20\%$ 。

(2) 冲击击穿电压 V_{si} 。GDT 的击穿电压是随着测试电压上升速率的增大而增大的。图 2.14-13 表示了 $U_{sdn} = 230V$ 的 GDT 以不同上升速率 dv/dt 的测试电压所测得的击穿电压。从图 2.14-13 可以看出, 测试电压 $dv/dt = 100V/\mu s$ 时的击穿电压大体是直流击穿电压的 1.5 倍, $dv/dt = 1000V/\mu s$ 时约 2.2 倍。

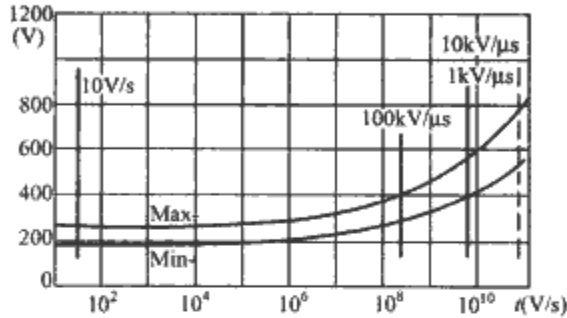


图 2.14-13 GDT 的击穿电压与测试电压 dv/dt 的关系 (样品的 $U_{sdn} = 230V$)

通常把上升速率为 $1000 \times (1 \pm 20\%)$ V/ μs 的斜升电压测得的击穿电压称为 GDT 的冲击击穿电压 V_{si} , 它不应大于规定值。

(3) 绝缘电阻。GDT 的每个引出端对其他各引出端的绝缘电阻, 不应低于 100M Ω 。测试电压为直流 50V (标称直流击穿电压 90~150V 的 GDT), 或直流 100V (标称直流击穿电压高于 150V 的 GDT)。

(4) 电容量。GDT 的每个引出端对其他各引出端的电容量不应大于 20pF (实际上一般在 1~5pF 之间)。测试信号频率 1MHz。GDT 低电容量使得它在工作频率高的信号 SPD 中得到了广泛的应用。

(5) 放电电流能力。表征 GDT 放电电流能力的参数主要有以下几项 (见表 2.14-2):

- 1) 标称冲击放电电流。GDT 能够承受的 10 次 8/20 放电电流的峰值。
- 2) 最大单次冲击放电电流。GDT 能够承受的 1 次 8/20 放电电流的峰值。它大体是 10 次 8/20 放电电流峰值的 2 倍。
- 3) 最大单次 10/350 放电电流。GDT 能够承受的 1 次 10/350 放电电流的峰值。
- 4) 标称工频放电电流。GDT 能够承受的 10 次 50~62Hz 工频放电电流的有效值, 每次放电持续 1s。
- 5) 冲击放电寿命。表 2.14-2 规定了寿命试验的电流波形、峰值和次数, 必要时合同可以规定更严格的试验要求。

表 2.14-2 GDT 的放电电流等级

等级	工频放电 电流 1s, 10 次(A)	冲击放电电流		n 次脉冲电流的寿命试验		
		8/20 波, 10 次(kA)	10/350 波, 1 次(kA)	电流峰值 (A)	电流波形	
					10/1000	6/310*
1	0.05	0.5		1	n=300	n=500
2	0.1	1.0		5		
3	2.5	2.5	1	50		
4	5	5	2.5	50		
5	10	10	4	100		
6	20	10	4	100		
7	20	20	4	200		
8	30	10	4	100		
9	40	20	4	200		

注 此表摘自 IEC 61643-311—2001《低压浪涌保护装置的元件 第 311 部分: 气体放电管 (GDT) 规范》。
* 开路电压波形 10/700, 见 IEC 61000-4《电磁兼容性 (EMC) 第 4 部分: 试验和测量技术》。

(6) 横向电压。将上升速率为 1000V/ μs 的斜升电压同时加在三极 GDT 的两个放电间隙上时, 两间隙击穿放电的时间差不应大于 200ns。

(7) 直流过保持电压。GDT 在直流工作电压下承受冲击而击穿导通后, 从冲击消失到 GDT 截止的时间, 应小于规定值 (例如 150ms)。这个时间与试验条件关系很大, 合同应给予明确规定。

2.2.3 GDT 的失效模式

GDT 的失效模式可归结为以下四种:

- (1) 短路失效模式。在这一模式中, GDT 永久性地短路。
- (2) 低击穿电压失效模式。GDT 的直流击穿电压低于该批产品初始平均值的 50%。
- (3) 高击穿电压失效模式。GDT 的直流或冲击击穿电压高于该批产品初始平均值的 150%。
- (4) 低绝缘电阻失效模式。GDT 的绝缘电阻低于 1M Ω 。

3 低压配电系统用 SPD

粗略的统计表明, 在过电压引起的电气/电子设备损坏中, 从电源渠道侵入的浪涌所造成的损坏约占 80%, 因此现阶段电源用 SPD 的用量最多。电源用 SPD 的技术标准主要有:

GB 18802.1—2002/IEC 61643-1: 1998《低压配电系统的电涌保护器 第 1 部分: 性能要求和试验方法》。

GB 18802.12—2006/IEC 61643-12: 2002《低压配电系统的电涌保护器 第 12 部分: 选择和使用导则》。

美国保险商实验室 (UL) 的标准 UL 1449, 也是 SPD 行业经常使用的标准。此外, 我国通信、铁道等产业部门还依据本行业的应用特点制定了相应的行业标准。这些标准是讨论的依据。

3.1 电源用 SPD 的类型

SPD 中至少应有一只电压限制元件, 根据该元件特性的不同, 可把 SPD 分为三类:

- (1) 钳位特性 SPD: 仅由钳位特性元件构成的 SPD。
- (2) 开关特性 SPD: 仅由开关特性元件构成的 SPD。
- (3) 混合特性 SPD: 既有钳位特性元件, 又有开关特性元件构成的 SPD。

不同特性的 SPD, 它们的测试方法、应用技术是有差别的。

依据电源用 SPD 安装地点的电磁环境的不同, 将它划分为三个试验级别, 符合各个试验级别要求的 SPD 分别称为 I、II、III 级试验 SPD。

I 级试验 SPD 安装在防雷保护区 LPZ0B/LPZ1 的界面上, 这里的 SPD 可能要传导一部分直接雷电流。例如有直击雷防护的建筑物供电系统的入口处, 即从供电变压器二次侧到供电设施的过电流断路器之间的固定连接式 SPD, 包括电能表中的 SPD。

II 级试验 SPD 安装在防雷保护区 LPZ1/LPZ2 的界面上, 这里对雷电的暴露强度较 I 级试验弱, 在这些部位不会有直接雷电流, 但雷电冲击尚未得到足够的抑制。例如在供电设施过电流断路器负荷侧的固定连接式 SPD, 包括安装在分配盘中的 SPD。

III 级试验 SPD 安装在对雷电的暴露强度较 II 级试验 SPD 安装部位更弱的地方, 即 LPZ2 后续部位。一般来说这

些部位的上游已经将浪涌电压限制到一定电平了, 因此试验时不是规定电流值, 而是规定电压 U_{oc} 。例如在配电盘后至少 10m 远处的 SPD、带电源线的插座型 SPD, 以及安装在

被保护用电设备中的 SPD 等都列入Ⅲ级试验 SPD。

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级试验的差别见表 2.14-3, 表中列出的几种试验电流/电压的意义如下:

表 2.14-3 I、II、III级试验的试验脉冲

试验分级	用作对 SPD 分级的参数	预处理 15 次冲击的脉冲	动作负载试验的脉冲	测量限制电压的脉冲	
				钳位特性 SPD	开关和混合特性 SPD
I 级试验	冲击电流 I_{imp}	标称放电电流 I_n	冲击电流 I_{imp}	标称放电电流 I_n	标称放电电流 I_n 和 1.2/50 电压波
II 级试验	标称放电电流 I_n		最大放电电流 I_{max}		
III 级试验	组合波 U_{oc}	组合波 U_{oc}	组合波 U_{oc}	组合波 U_{oc}	组合波 U_{oc}

Ⅰ级试验的冲击电流 I_{imp} 是个单极性电流波, 电流从 0 上升到峰值 I_{peak} 的时间 $t_f \leq 50\mu s$, 在不超过 10ms 的时间内所泄放的电荷量为 Q , 比能为 W/R , 参数 I_{peak} 、 Q 和 W/R 应符合下面的关系

$$Q = 0.5 I_{peak} \tag{2.14-7}$$

$$W/R = 250 I_{peak}^2 \tag{2.14-8}$$

式中: I_{peak} 为电流峰值, kA; Q 为电荷量, As; W/R 为比能, J/ Ω 。

标称放电电流 I_n 和Ⅱ级试验最大放电电流 I_{max} 都是 8/20 电流波。 I_n 代表了在 SPD 的安装地点预期出现频度相当高的浪涌电流峰值, 而 I_{max} 的预期出现概率极小。现行的 SPD 技术规格书中, 一般规定 $I_{max} = (2 \sim 3) I_n$ 。 I_n 在Ⅰ、Ⅱ级试验 SPD 中用于测量限制电压和动作负载试验的预处理试验。 I_{max} 用于Ⅱ级试验 SPD 的动作负载试验。

Ⅲ级试验 SPD 的测试都用 1.2/50-8/20 组合波, 即其开路电压为规定值 U_{oc} 的 1.2/50 电压波, 短路电流是峰值为 I_{sc} 的 8/20 电流波, 且冲击发生器的输出阻抗 $U_{oc}/I_{sc} = 2\Omega$ 。

3.2 模数化 SPD 模块的结构

现在使用数量最多的电源用 SPD 是模数化 SPD 模块。它和大多数低压终端电器一样, 器件的宽度制成 9mm 的整数倍, 且采用标准导轨安装。这种模块有可分式和一体式 (整体式) 两种。可分式模块的功能件与安装基座之间通过插头座连接, 因而当功能块损坏后可以拔出更换。一体式的功能件与安装基座是不可分的。图 2.14-14 表示了模数化 SPD 模块的一种内部结构, 整个结构装入一个塑料外壳中。

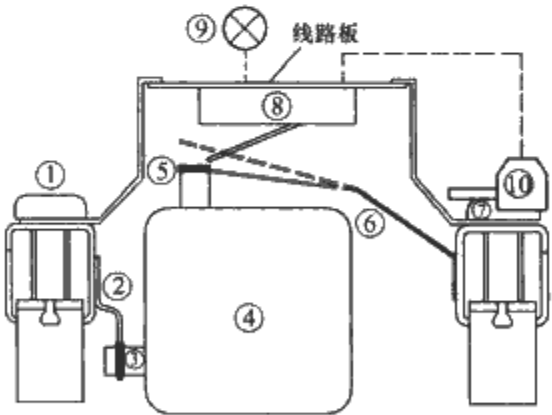


图 2.14-14 模数化 SPD 模块的一种内部结构

- ①、⑦—接线螺钉端子; ②—连接导体; ③—连接导体与 MOV 引出端的焊接点; ④—MOV 电阻片; ⑤—低熔点的热脱离焊接点; ⑥—弹性金属片; ⑧—微动开关;
- ⑨—指示灯; ⑩—送出遥测信号的接线端子

SPD 模块中的构件, 除了电压限制元件外, 还有外壳、接线端子、连接导体、脱离器、状态指示器和遥测信号接线端子等。

3.2.1 外壳

SPD 模块的外壳大多用模压塑料绝缘外壳, 常用材料为 PBT 塑料或增强尼龙。SPD 技术标准对外壳提出了多方面的要求, 主要是机械强度 (撞击试验)、耐热性 (提高温度条件下的球压试验)、阻燃性 (850℃ 的灼热丝试验)、耐漏电起痕, 以及绝缘性 (绝缘电阻和耐电压试验) 等。外壳的防护等级 (表征外壳防止外部固体异物进入壳内, 防止人手触及带电部分或运动部件, 以及防止水进入壳内的防护程度的指标) 一般要求达到 IP20 等级。

3.2.2 接线端子

确保 SPD 与外电路连接的接线端子的质量, 对于 SPD 的可靠工作有重要意义。在产品设计中应确定流过每一个接线端子的最大放电电流和最大允许短路电流, 二端口 SPD 和输入/输出分开的一端口 SPD 的接线端子, 还应确定最大负载电流。接线端子的接线能力应与上述两个电流的要求相吻合, 例如标称放电电流不小于 5kA 时, 接线端子要能夹紧截面积 4mm² 及以下的导线。在 SPD 的生产和检验中, 还应通过以下三项试验来保证接线端子的质量: ①按规定将导线接入接线端子后, 通过对导线的拉力试验来检验连接的可靠性; ②经过接线试验后检验导线的外观应没有过度损伤, 螺纹没有滑扣和损坏; ③测量接线端子与导线之间的接触电阻不应超过规定值 (例如 0.05 Ω)。

3.2.3 连接导体

SPD 内部的连接导体应有足够的截面积, 长度要尽量短。冲击电流载流导体中的电流密度不能超过允许值, 否则在大冲击电流下, 导体的温升会太高, 甚至熔断。现行的 SPD 技术标准还没有给出内部导体电流密度的规定。下面提出一个铜导体的允许冲击电流密度 J 的粗略估算方法, 该方法把冲击电流在导体中引起温升的过程近似地作为一个绝热过程来处理, 即冲击电流产生的能量全部被导体吸收, 使导体温度升高 ΔT , 于是只要给定允许的导体温升 ΔT , 就可以计算出导体的允许电流密度 J (kA/mm²) 了, 铜导体的计算公式为

$$J = 14.1 \sqrt{\frac{\Delta T}{k}} \tag{2.14-9}$$

式中: ΔT 为导体允许温升, K; k 为波形系数, 对于 8/20 电流波 $k=12.2$, 对于 10/350 电流波 $k=250$ 。

这样, 若允许一次冲击电流引起的温升 $\Delta T=40K$, 则铜导体的允许电流密度对 8/20 电流为 25.5kA/mm², 对 10/350 电流为 5.6kA/mm²。

SPD 中连接导体的长度要尽量短, 以减小浪涌电流在连接线上所产生的电阻性压降和电感性压降, 以及导线所受的电动力。一般来说 SPD 中连接导体的电阻性压降相对于电感性压降要小得多, 因此通常只考虑电感性成分。导体的分布电感可按 0.01 $\mu H/cm$ 来估计, 于是一个 8/20-40kA 的

冲击电流在 1cm 长导体上所产生的电感性压降大体等于

$$u = L \frac{di}{dt} = 0.01\mu\text{H} \times \frac{40\text{kA}}{8\mu\text{s}} = 50\text{V}$$

这里把电流从零上升到峰值的过程近似看作是线性上升的过程。在计算 SPD 的限制电压时,严格来说不能把导体的电感性压降与电压限制元件的限制电压简单相加,因为两者的相位,即出现的时间点不相同。在实际工作中,作为一种留有余地的粗略估计,常把它们直接相加来计算整个 SPD 的限制电压。

3.2.4 SPD 中的电动力问题

SPD 中的放电电流峰值,有时高达几十千安,或更高,因此结构设计时必须考虑电动力问题,要能经受住电动力的反复作用。

一对在空气介质中的方向平行的载流导体,电流分别为 I_1 和 I_2 ,如果它们平行相对的长度为 L ,相互间距为 a ,则相互作用的电动力 F 可用下式作近似计算

$$F = 2 \times 10^{-7} I_1 I_2 L / a \quad (2.14-10)$$

式中: F 为电动力, N; I_1 、 I_2 为电流, A。

电动力 F 的方向是这样的:如果两个电流方向相同,则使载流导体相互靠近;如果两个电流方向相反,就将载流导体相互推开。电动力的大小还与两个载流导体的相对方向密切相关,两个载流导体平行时电动力最大,垂直时最小。所以 SPD 的内部设计,为减小电动力,应尽量减小导体长度,加大两载流导体之间的距离,使两载流导体的走向相互垂直。

3.2.5 电气间隙和爬电距离

电位不等的金属件之间的电气间隙和爬电距离,要满足 SPD 技术标准 GB 18802.1—2002 的要求,以防止浪涌入侵时构件之间发生跳火。

3.2.6 灌封材料

有的 SPD 采用灌封环氧树脂或硅树脂等绝缘材料的办法,来将内部构件与外壳固定起来,在这种情况下,灌封绝缘材料的选择和灌封工艺是非常重要的,灌封材料应满足以下几个方面的要求:

- (1) 具有足够的绝缘性、防潮性和机械强度。
- (2) 不燃性。SPD 必须保证在 TOV 条件下和短路失效条件下不会起火。多数有机灌封材料,尽管它的阻燃性能满足 V0 级的要求,但它仍是一种燃料,因此以少用为好。
- (3) 与被灌封元件的化学稳定性。事实证明,有的灌封材料会与 MOV 的陶瓷体发生化学反应,使 MOV 型 SPD 的漏电流越来越大,最后烧坏。

- (4) 热胀系数与外壳的匹配性。灌封材料的热胀系数与外壳不匹配,就会导致 SPD 存放一段时间后或经过温度循环试验后外壳开裂。

3.2.7 SPD 结构的冲击验证试验

一个新设计的 SPD,往往有设计人员考虑不到的问题。为了揭示这些问题,以便采取改进措施,应当在规定的最大放电电流范围内,从小到大地进行冲击验证试验,试验中重点检查以下五个方面:

- (1) 测量 SPD 内部的温度分布,找出过热点。
- (2) 检查是否有跳火和击穿部位,以确定空气间隙和爬电距离是否足够。
- (3) 检查 SPD 内部各构件上的限制电压,研究进一步降低它们的可能性。
- (4) 检查放电时和放电后一个短时间内是否有高频振荡,若有,应改进设计,将它消除。

- (5) 检查电动力的影响和结构牢固性。

3.3 电源用 SPD 的安全性

SPD 本身是一种安全保护器件,但在电路中特别是电源电路中接入 SPD 后,可能带来新的安全问题。SPD 的电压限制元件是并接在系统上的,无论是钳位特性元件还是开关特性元件,都有可能发生老化失效或短路的现象,从而导致 SPD 本身或系统起火,甚至出现人身电击的危险性事故。

SPD 的这种不安全性有两种情况:①进入 SPD 的电功率及其持续时间,超过了它保持热平衡的允许值,致使 SPD 的温度持续上升而引起燃烧;解决这一问题的对策是在 SPD 中设置热脱离器。②一个过强的冲击电流或暂时过电压使 SPD 突然(例如不足 1s)击穿短路,而 SPD 的短路阻抗相对于电源阻抗很小,因此击穿后进入 SPD 的功率并不大,结果它的温度达不到热脱离器的动作温度,而使短路状态长时间维持;解决这一问题的对策是在 SPD 的电路中再加入后备保护。

3.3.1 SPD 的热脱离器

3.3.1.1 MOV 漏电流持续增大的原因

SPD 中的 MOV 在正常工作寿命期内发生漏电流持续增大而热击穿的原因,主要有下面三个:

- (1) SPD 安装地点的浪涌过电压的出现频度、幅值较大,使 MOV 内在的安秒资源提前耗尽而进入劣化失效阶段。

- (2) 持续的较大的系统过电压。实验结果表明,当工频电压对 MOV 的加压比 R_{ap} 在 0.6 左右时 MOV 型 SPD 能在规定的寿命期内长期而稳定地工作。 R_{ap} 在 0.8~1.13 时 SPD 能保持热稳定,即电阻体的温度、电阻性电流和功耗都能稳定在某个数值上,但稳定工作的持续时间将随着 R_{ap} 的提高而迅速减小。 R_{ap} 高到 1.14 以上,SPD 不能保持热稳定,很快发生热击穿。MOV 耐受工频过电压的时间,即从加上工频电压到击穿短路的时间 τ ,与加压比 R_{ap} 的统计关系如图 2.14-15 所示。

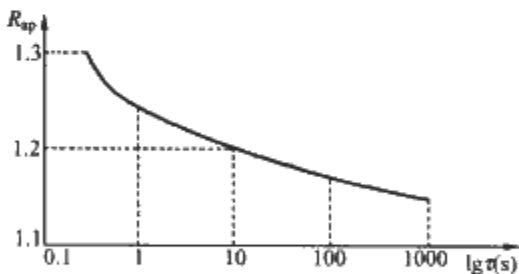


图 2.14-15 MOV 的工频过电压耐受性

- (3) SPD 存在制造缺陷,因而提前进入老化失效阶段。例如灌封材料与 MOV 发生化学反应,或者 MOV 电阻片本身有早期失效问题。因此 SPD 制造中应重视对 MOV 的可靠性筛选,将有早期失效隐患的产品剔除。开关特性 SPD 也有热击穿的问题。气体放电管、空气间隙等电压开关型元件在数值不大的持续工频电流下也会出现短路失效的情况,也应设置过热保护脱离器。

3.3.1.2 热脱离器的技术要求

目前 SPD 的大多热脱离器的结构如图 2.14-14 所示,在 MOV 的引出片上设置一个低熔点的焊接点,其熔化温度一般在 120~150℃之间,当焊接点的温度超过该熔点时,依靠弹性片或弹簧的弹力将电路连接拉断。这个脱离机构应满足下述基本要求:

- (1) 在给 SPD 通入电流,检验热脱离器动作的试验中,应满足三项要求:①SPD 的表面温升不超过 120K;②脱离

器动作后 5min 内相对于环境温度的温升不超过 80K, 脱离器的断路应可靠; ③在 SPD 的 U_c 电压下的漏电流应不超过 0.5mA。

(2) 在 SPD 规定的机械试验和气候试验, 以及 SPD 的动作负载试验中, 脱离器不应动作。

(3) 脱离器在 SPD 的 U_c 电压下动作时应有一定的开断能力。

依据通信行业中 SPD 的运行经验, YD/T 1235.2—2002《通信局(站)低电配电系统用电涌保护器测试方法》对 SPD 的热脱离器提出了更严格的要求, 规定无论是钳位特性 SPD, 还是开关特性 SPD, 都应设置脱离器, 并将试验电流提高到 5A, 要求 5A 工频电流通入 SPD 时, 脱离器能有效脱离。

3.3.1.3 热脱离器的问题及其改进措施

提高热脱离器的工作可靠性是 SPD 行业最重要的技术课题之一。目前 SPD 热脱离器主要有三个问题: ①误动作, 即 SPD 并未发生过热, 脱离器就已脱离, 主要原因是低熔点焊点的机械强度差, 弹性力就可将它拉脱; ②不动作, 主要原因是热设计不合理和 MOV 电阻片质量差; ③脱离特性不一致, 分散性大, 主要原因是手工焊接, 质量一致性差。提高 SPD 热脱离器技术性能的工作方向主要有以下四点:

(1) 开发一种新的低熔点接点材料, 它要满足这样一些要求: 熔点在 130~150℃之间; 具有足够的机械强度, 能够承受弹性零件的拉力; 导电性良好, 在 SPD 的最大放电电流下的温度要远低于它的熔点, 且电压降要尽可能小, 以免使 SPD 的限制电压明显增大; 晶相稳定, 能长期保持上述要求的性能; 不含有禁用材料, 如铅, 镉等。

(2) 改进 SPD 内部的热设计。如尽可能将脱离接点设置在 MOV 的中心位置, 因为一般来说这一部位的温度最高; 改善脱离接点与 MOV 之间的热耦合, 减小它们之间的热阻, 减小与脱离接点和 MOV 相连接的其他构件的热容量等。总之要使 MOV 所产生的热量尽可能快和尽可能多地传导给脱离接点。从这一原则出发当多片 MOV 并联时, 应在每一电阻片上分设脱离接点, 那种多片共用一个脱离接点的做法是不合理的。

(3) 提高 MOV 电阻片内部结构的均匀性, 以提高它在工频电流下能吸收的能量。

(4) 开发新的过热脱离机构, 如加进电子控制电路等。

3.3.2 SPD 的后备保护

SPD 的热脱离器是依靠热传导来工作的, 它的响应时间一般要数秒, 对于强过载引起的 MOV 立即击穿来不及响应, 而 MOV 短路后, 因其阻抗小, 电源系统又供不出足够的电流, 因此热脱离接点始终不能脱离。在这种情况下, 就要求在 SPD 的内部或外部有其他保护电器来将 SPD 短路后的工频电流切断, 这种保护称为后备保护。

具有过电流保护功能的脱离器, 多数 SPD 采用外置式。通常是在 SPD 外部的进线前端装设过电流保护电器(熔断器或断路器), 因此可把过电流保护电器当作具有过电流保护功能的 SPD 外置式脱离器。采用熔断器的问题是它不能同时满足 SPD 的最大放电电流和工频额定电流的要求。于是, 可用 n 个小规格的 MOV 并联来保证放电能力, 而在每个小规格 MOV 中串联熔断器。这个办法可以解决大浪涌电流值和小工频电流值的矛盾, 但实施起来麻烦。使用断路器的问题是它的阻抗使限制电压明显升高, 可以比使用熔断器所产生的残压高 0.1~0.25 倍。

如何选用与 SPD 匹配的过电流保护器至关重要。选择

SPD 的过电流保护电器时, 应该从以下三个方面进行考虑:

(1) 必须符合 GB/T 18802.12—2006《低压配电系统的电涌保护器 (SPD) 第 12 部分: 选择和使用导则》中的规定“当 SPD 和过电流保护器配合时, 在标称放电电流 I_n 下, 建议过电流保护器不动作; 当电流比 I_n 大时, 过电流保护器动作是可以的。对于可复位过电流保护器, 例如一个断路器, 不应被这种电涌损坏。”

(2) 要根据 SPD 安装处可能产生的最大短路电流以及 SPD 的短路电流承受能力来选择过电流保护电器的额定电流值, 要保证“SPD 和与之相连的过电流保护器能耐受的短路电流(当 SPD 失效时产生的)不小于安装处预期产生的最大短路电流。”

(3) 由于在电源进线端处还有过电流保护电器, 它是用于对线路的过载和短路进行保护的, 当 SPD 短路失效时, 为了保证被保护设备供电的连续性, 进线端处的过电流保护电器不应动作, 而 SPD 外置式过电流保护电器应动作。

3.3.3 SPD 的状态指示

SPD 中设置脱离器后, 应有相应的状态指示器, 使 SPD 安装现场的和远地的工作人员知道 SPD 是否处在正常的工作状态, 脱离器是否已动作。

安装在 SPD 本体上的状态指示器有机械式和信号灯两种。机械式指示实际上是在 SPD 视窗后设置一个绿红两色的指示片(杆), 脱离器动作前为绿色, 动作后为红色。如果是信号灯指示, 约定的做法是脱离器动作前为绿色信号灯亮, 动作后绿色信号灯熄灭。

通向远地的所谓的遥测信号一般是微动开关触点的状态, 脱离器动作时推动微动开关, 使其触点状态改变。也可以送出两个不同电平的电压信号来表示脱离器是否动作。

3.4 SPD 中电压限制元件的组合

最简单的 SPD 中仅有一只 MOV 或一只电压开关元件, 但在很多情况下为了提高某项性能指标, 或获得一种新的功能, 同一只 SPD 中常常采用多个元件相组合的电路, 这些元件可以是相同的, 也可以是不同的。

3.4.1 多个 MOV 的并联运用

SPD 中 MOV 并联运用的目的主要有三个:

(1) 提高 SPD 的放电电流能力, 降低限制电压。现行的 MOV 电阻片的最大直径是 80mm, 其最大放电电流为 8/20-100kA, 如果要获得更大的放电能力, 就必须将多个 MOV 电阻片并联运用。即使最大放电电流小于 100kA, 也常常采用多个小直径电阻片并联的办法来实现, 因为现行的陶瓷生产技术在制作直径/厚度比大的陶瓷件时的合格率低, 且制成品的内部结构均匀性差。

(2) 对 SPD 增设后备保护。后备保护采用压敏电压比主保护元件高的 MOV, 因此在一般情况下由主保护元件泄放浪涌电流, 后备保护元件处在待命休息状态, 一旦主保护元件失效脱离, 后备保护元件就承担起保护作用, 尽管它的限制电压高一点, 但 SPD 不会完全失去保护功能。

(3) 将不同特性的 MOV 电阻片并联, 以满足一些特殊的性能要求。

对于第一种并联运用, 其核心是保证电流在各并联元件中均匀分配, 而且能够在工作寿命内保持这种均匀性。也就是说, 并联各元件的冲击电流—残压特性应相同, 而且不仅是初始状态相同, 更主要的是老化后的特性仍然差别不大。这里所说的老化包括电压应力下的老化和冲击电流应力下的老化两个方面。实现这个目标的技术要点包括:

- 1) 并联元件应是同一生产批的 MOV 电阻片。
- 2) 并联元件应经过电压/温度应力和冲击电流应力的老化筛选, 删除了有早期失效隐患的产品。
- 3) 经过测量配对: 在较低电流 (例如 0.1 倍的标称放电电流) 下测量限制电压, 将该限制电压值相同 (例如偏差不大于 3%) 的 MOV 元件进行并联组装。之所以按较低电流下的限制电压进行配对, 是因为随着冲击电流的增大, MOV 的非线性下降, 同一电压下并联元件的电流差别自动减小, 因而若保证了较小电流时的均流性, 大电流时的均流性也就自然得到了保证。图 2.14-16 所示的曲线说明了这一点, 冲击电流—限制电压特性分别为 A、B 的两只元件并联, 它们在大电流时的电流差 Δi_2 比较小电流时的电流差 Δi_1 小。

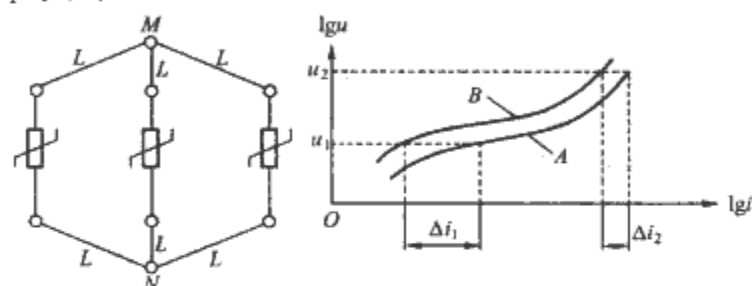


图 2.14-16 MOV 的并联

- 4) 在安装工艺上应保证每个并联元件连接到并联公共点 M、N (如图 2.14-16 所示) 的导体长度 L 尽量相同, 因为导体长度不同, 阻抗不同, 会影响均流性。
 - 5) 必要时, 在各并联支路中串联均流阻抗。
- 也有将市场销售的 MOV 型小放电电流的 SPD 直接并联, 以此来扩展放电能力, 理论分析和实践结果都证明这是行不通的, 因为它们没有经过任何配对处理。按照正常的生产公差, 即使是同一生产厂的同一批产品, 它们的电流/电压特性也可能相差 10%, 由于在标称放电电流附近, MOV 的非线性指数大约为 10, 若两只限制电压差 10% 的 SPD 并联, 它们的电流比为 $1.1^{10} = 2.59$ 。例如, 当 10kA 的浪涌电流侵入时, 两只这样的 SPD 并联时, 其中的电流可能分别是 2.78kA 和 7.22kA。可见, 电流分配极不均匀, 不能达到并联的目的。

3.4.2 MOV 与 GDT 或空气间隙的并联运用

GDT 或空气间隙具有放电电流大的优点, 但由于气体的雪崩击穿需要时间, 因此对浪涌的响应较慢, 用 MOV 与之并联可克服这一缺点。图 2.14-17 表示了这个组合的工作特性, 当浪涌电流如图 2.14-17 (b) 所示侵入时, MOV 首

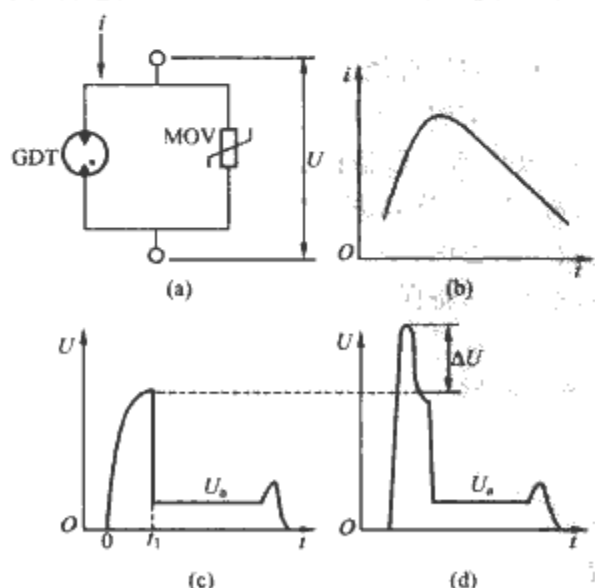


图 2.14-17 MOV 与 GDT 或空气间隙的并联

(a) 电路; (b) 入侵浪涌电流; (c) 并联组合的电压; (d) 没有 MOV 时的电压

先导通, 电压被 MOV 限制 [如图 2.14-17 (c) 所示], 当这个限制电压达到 GDT 或空气间隙的击穿电压 (t_1 时刻) 时, GDT 或空气间隙击穿导通, 电压跌落到弧光放电电压 U_a , 浪涌电流全部流入 GDT 或空气间隙, MOV 得到保护。因此这里可用放电能力小的 MOV。若仅有 GDT 或空气间隙, 没有 MOV 与之并联, 则限制电压波上有个尖峰 ΔU [如图 2.14-17 (d) 所示], 并联 MOV 后, 这个尖峰消失 [如图 2.14-17 (c) 所示]。这一组合方式兼有 MOV 响应快和 GDT/空气间隙放电电流能力大的优点。运用这一方式, 已制造出 10/350 放电能力 100kA, 响应时间 25ns, 保护水平 1500V 的 SPD。

3.4.3 MOV 与 GDT 或空气间隙的串联运用

MOV 与 GDT 或空气间隙的串联如图 2.14-18 所示。由于两种元件流过同样的电流, 因此它们的额定放电能力应相同。当浪涌侵入时这个串联组合的工作过程如下:

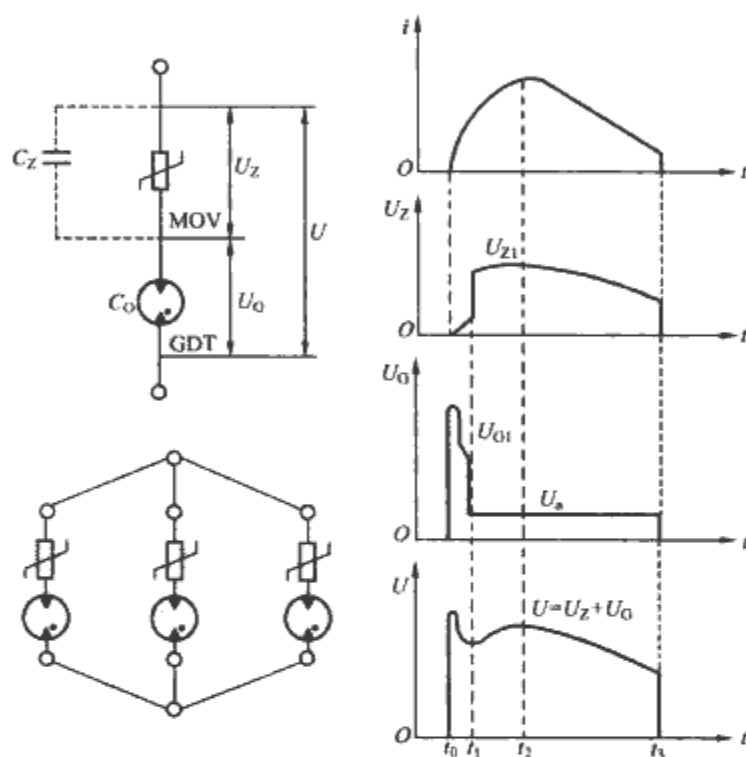


图 2.14-18 MOV 与 GDT 或空气间隙的串联

- (1) 在浪涌侵入的初始时刻 t_0 , 串联组合两端的电压按两个元件的电容量分配, 由于 MOV 的电容量有几百到几千皮法, 而 GDT 只有 1~2pF, 因此电压几乎全部加在 GDT 上, GDT 在 t_1 时刻击穿导通。(如果 MOV 本身的电容量不够大, 可以在 MOV 上再并联一个电容)
- (2) GDT 击穿导通后, 它两端的电压跌落到弧光放电电压 U_a , 而 MOV 上的电压突升到一个与此时刻电流相应的数值 U_{Z1} 。串联组合两端的电压 $= U_{Z1} + U_a$ 。
- (3) 串联组合导通后, MOV 两端的电压随着浪涌电流的变化有不大的变化, 而 GDT 上的电压基本上保持为 U_a 。这种状态一直维持到浪涌电流减小到小于 GDT 的维持电流时, 串联组合关断 (t_3 时刻)。

从上面的分析可以看出, 串联组合两端的电压, 在一开始大约等于 GDT 或空气间隙的击穿电压, 以后基本上取决于 MOV 的钳位电压。

使用这个串联组合的目的在于:

- 1) 切断 GDT 或空气间隙击穿导通后的续流。在这个串联组合中, 当组合两端交流电压的瞬时值低于 MOV 的压敏电压时, 流入组合的电流小于 GDT 的维持电流, 因而很快截止。
- 2) 切断 MOV 的漏电流, 使 MOV 在正常工作时不承受电压应力, 从而延缓了 MOV 的老化, 延长了 MOV 的工

作寿命,同时大幅度地降低了 MOV 电容量对系统工作的影响。

3) 降低了单独用 MOV 时的限制电压。例如,设计一个用于 50Hz/220V 单相电源,标称放电电流 $I_n=10\text{kA}$ 的 SPD。若仅用 MOV,则选用直径 32mm,压敏电压 620V 的 MOV 元件,它在 $I_n=10\text{kA}$ 时的限压比大约是 2.3,限制电压 $=620\text{V}\times 2.3=1426\text{V}$ 。

若采用 GDT 与 MOV 的串联组合,可选用直流击穿电压 $U_{de}=330\sim 380\text{V}$,对 8/20 雷电流的放电能力达到 $I_n=10\text{kA}$, $I_{max}=20\text{kA}$ 的 GDT,和压敏电压为 470V、直径为 32mm 的 MOV。按照 GB 18802.1—2002 的规定,这个串联组合的限制电压是下面两个数值中的大值:一是 GDT 的冲击击穿电压,它小于 900V;二是在 $I_n=10\text{kA}$ 时 MOV 的限制电压与 GDT 的弧光放电电压之和,即 $470\text{V}\times 2.3+50\text{V}=1131\text{V}$,因此该组合的限制电压是 1131V,比仅用 MOV 时的 1426V 低了 295V。

4) 提高放电电流能力。仅仅 GDT 是不能用并联的办法来提高放电能力的,因为当并联组合中的一只 GDT 首先击穿导通后,电压就降到弧光放电电压,其他 GDT 就不可能再击穿了。但采用 GDT 与 MOV 的串联组合就可以并联(如图 2.14-18 所示),为此应选用这样的 MOV,使得当任何一个串联组合击穿导通后,在放电电流小于串联组合标称放电电流 I_n 的条件下,该组合两端的电压都能迫使其他串联组合也击穿导通,这样每个串联组合中的电流都不会过载。

将 GDT 与 MOV 串联,再将这样的串联组合并联,以提高放电电流能力的这种做法中,也可不用 MOV 而用其他阻抗,如线性电阻器、电感器,或它们的组合。这个串联组合依然有气体放电器件响应慢的缺点。

3.5 大放电能力的空气间隙 SPD

近几年来,用作 I 级试验 SPD 的空气间隙型 SPD 有了长足的发展,放电电流能力已达到 10/350-50kA 以上,熄

灭电弧的能力也有明显提高。图 2.14-19 列举了三种空气间隙 SPD,其中带触发电极的空气间隙 SPD 和多层间隙 SPD 是近几年新开发的品种。

图 2.14-19 (a) 所示的是一种羊角电极空气间隙 SPD。两个放电电极的间距 s 是决定放电电压的主要因素,当电极间击穿导通发生电弧时,羊角电极将电弧拉长和冷却,以加速电弧的熄灭。有的羊角电极上还套有一个灭弧罩。电极采用耐高温金属,以提高放电能力。有的空气间隙 SPD 中还设置有产气材料,这种材料在电弧作用下能产生灭弧的气体,使电弧迅速熄灭,但当这种材料消耗完后就没有灭弧能力了。

图 2.14-19 (b) 所示的是带触发电极的空气间隙 SPD。它有主电极 1、2 和点火电极 3 等三个电极。1—2 间的主放电间隙 S ,大于 3—2 间的点火间隙 δ ,因而 3—2 间击穿电压比 1—2 间的击穿电压低得多。当浪涌电压出现在 1—2 上时,间隙 δ 首先击穿导通,进而引起间隙 S 击穿导通。3—2 间的击穿电压由一个专门的点火电路来提供。采用这种设计可在一定程度上解决可靠性与低击穿电压的矛盾。因为,为了得到低的击穿电压,间隙 S 要小,一般 $S<0.5\text{mm}$,但这样一来,因放电高温所挥发出来的导电颗粒就容易使主电极 1—2 间的绝缘电阻和击穿电压降低,甚至导致失效。采用点火电极后, S 就可用较大值,而点火电极 3 的击穿电流受触发电流的限制不会很大,可以反复地可靠工作。

图 2.14-19 (c) 表示了多层间隙 SPD 的结构、工作原理和波形(图中画出了 4 个间隙)。它是由电极片 1 与中间开孔的绝缘环 2 交叠而成的,并且除第一个间隙 AG1 外,其他各间隙对公共端之间都并接一个电容器(几百皮法到数千皮法)。这样一来,当浪涌电压出现在这个组件上时,由于电容器 C_1 的旁路作用,电压几乎全部加在 AG1 上,因而间隙 AG1 首先击穿导通。同理推知,间隙 AG2、AG3、AG4 将依次击穿导通。图中的示波图是从这个组件两端测得的电压波形,可以清楚地看出四个间隙依次击穿的过程。

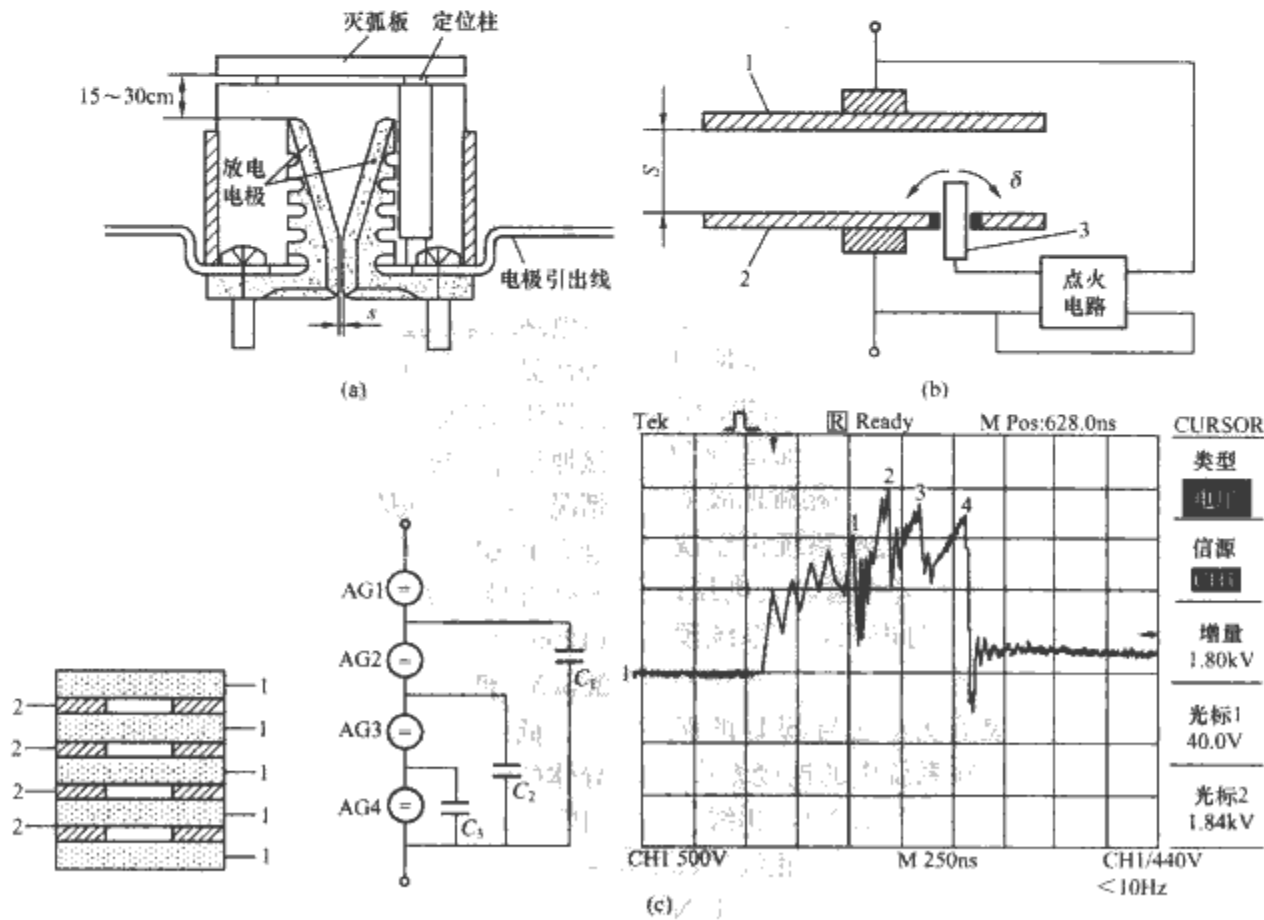


图 2.14-19 三种空气间隙 SPD

(a) 羊角电极型 SPD; (b) 带触发电极型 SPD; (c) 多层间隙型 SPD

显然，当所有间隙都击穿后，组件两端总电压等于各间隙放电电压降之和，只要它大于系统电压的峰值，那么，当浪涌电压消失后电流将自行截止，而不会发生续流。用于 220V 交流电源的这种 SPD 中含有 9 个间隙。

3.6 低压配电系统中 SPD 的配置

电源用 SPD 的制造和使用人员必须懂得 SPD 在低压配电系统中是怎样配置的，为此首先要了解低压配电系统的类型、标称电压和系统中的过电压。

3.6.1 低压配电系统的分类和标称电压

低压配电系统有两种分类方法：一是按带电导体的相数和根数分类，二是按接地系统分类。

按带电导体的相数和根数分类，常用的低压配电系统有以下 5 种：单相二线系统，单相三线系统，二相三线系统，三相三线系统和三相四线系统，如图 2.14-20 所示。

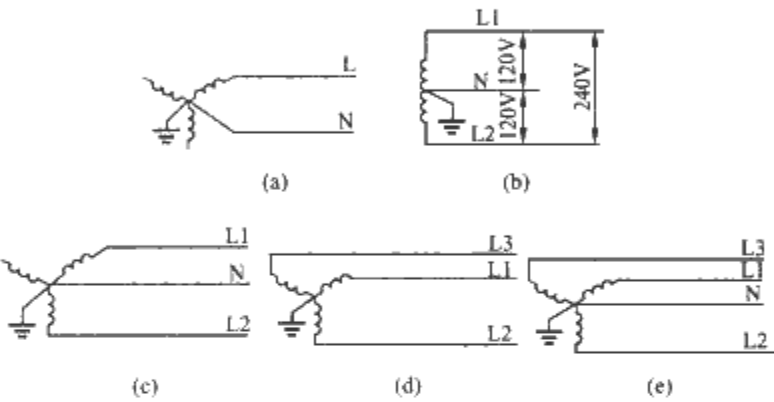


图 2.14-20 低压配电系统按带电导体的分类
(a) 单相二线；(b) 单相三线；(c) 二相三线；
(d) 三相三线；(e) 三相四线

低压配电系统按其接地系统的不同分为以下 5 种：TN-C，TN-S，TN-C-S，TT 和 IT 系统。我国 380/220V 低压配电系统的电源端变压器，是 10/0.4kV 变压器，该变压器有两种接地状态，即 10kV 不接地系统和 10kV 经小电阻接地系统。这两种不同的接地系统，当 10kV 高压侧发生一相碰地故障时，在低压供电系统中造成的过电压是不同的，因此对 SPD 有不同的要求。低压配电系统的标称电压有：单相系统的相电压 U_0 (V)——110~120，220~240，254~277，347；三相系统的相/线电压 (V)——120/208，(220~240)/(380~415)，(254~277)/(440~480)，347/600。

3.6.2 SPD 与低压配电系统的协调

各种低压配电系统对接入其中的 SPD 的要求是不同的，SPD 的设计和选用必须满足这些不同的具体要求，为此应考虑下面几个问题：①配电系统电压正偏差，即由于电网和电气装置运行条件的变化而引起的缓慢而持续的线间过电压；②配电系统低压侧发生一相碰地故障时，出现在 SPD 上的工频暂时过电压；③配电系统高压侧发生一相碰地故障时，出现在 SPD 上的工频暂时过电压；④配电系统由于铁磁谐振等其他原因而出现在 SPD 上的瞬时或暂时过电压；⑤SPD 本身失效短路过程所产生的暂时过电压，和系统预期灌入 SPD 的短路电流。

上述问题不仅与配电系统的类型有关，还与 SPD 的保护模式有关。所谓保护模式是指 SPD 在系统中的连接方式，SPD 可以连接在配电系统的相线—中性线 (L-N)，相线—地线 (L-PE)，中性线—地线 (N-PE) 以及相线—相线 (L-L) 之间。通常，把 L-PE 和 N-PE 称为共模保护，而把 L-N 和 L-L 称为差模保护。

(1) 配电系统的电压正偏差。由于发电机输出电压的波

动，以及输电线长度的不同和负载电流的变动，都会使 SPD 安装地点的电压发生波动。我国标准规定 220V 电网内的正偏差不大于 7%，一般按 10% 计算，一些质量差的电网的偏差超过 10%，SPD 必须适应安装地点电网的实际情况。

(2) 配电系统低压侧发生一相碰地故障和 SPD 短路失效所产生的过电压。配电系统低压侧发生一相碰地故障在实际工作中是难免的，它将在另两个非故障相产生过电压。一端连接在相线上的 SPD 的短路失效会引起同样的过电压。在 TN-S (TN-C-S) 接地系统中，当发生一相碰地故障时，因为它的地线 (PE 线) 是通过导线与中性线 (N 线) 连通的，另外两个非故障相的对地电压，相对于相电压 U_0 的增高不多。但在 TT 系统中，由于电气装置的保护接地与电源处的系统接地，在电气上不相关联，另两个非故障相对地电位将升高，其值一般不超过相电压的 50% (但 TT 系统中的 L-N 间的电压基本上还是 U_0 ，因为 TT 系统中的一相碰地主要是使得 N 线电位上升)。

考虑到电网电压的正常波动，配电系统低压侧发生一相碰地故障和 SPD 短路失效等引起的过电压，以及 SPD 在运行中的老化等因数，我国 GB 50057—1994《建筑物防雷设计规范》规定，SPD 的最大持续工作电压 U_c 应满足以下要求：

- 1) TT 系统 L-PE 模式 SPD: $U_c \geq 1.55U_0$ (U_0 为相电压标称值)。
- 2) TT 系统 L-N 模式 SPD, TN 系统 L-PE (PEN) 模式 SPD: $U_c \geq 1.15U_0$ 。
- 3) IT 系统 L-PE 模式 SPD: $U_c \geq 1.15U$ (U 为 IT 系统线电压标称值)。

考虑到上述因素，GB 18802.1—2002 要求，SPD 应能经受表 2.14-4 规定的暂时过电压 (TOV) 试验 5s。

表 2.14-4 考虑低压侧故障的 TOV 试验电压 (5s)			
	TN 系统	TT 系统	IT 系统
L-N 间的 SPD	$1.32U_{cs}$	$1.32U_{cs}$	$1.32U_{cs}$
L-PE 间的 SPD	$1.32U_{cs}$	$1.55U_{cs}$	—

注 表中 $U_{cs}=1.1U_0$ 。

(3) 配电系统高压侧发生一相碰地故障所产生的过电压。在 10kV 不接地系统中，当高压侧发生碰地故障时，出现在低压侧中性线 (N 线) 上的暂时过电压 (故障电压 U_f) 一般不超过 80V。

在 10kV 经小电阻接地系统中，又分为两种情况：①10kV 变电站的保护接地，与低压侧中性点系统接地是分开的，在这种情况下，当 10/0.4kV 变电站高压侧发生碰地故障时对低压侧没什么影响。②10kV 变电站的保护接地与低压侧中性点系统接地是合一的，且低压侧的接地是 TT 系统和 IT 系统，在这种情况下，当高压侧发生碰地故障时，低压侧中性线 (N 线) 上会有 1200V、200ms 的故障电压 U_f ，因此 N-PE 间的 SPD 应能承受有效值为 1200V，L-PE 间的 SPD 应能承受有效值为 $(1200+U_{cs})$ V、持续时间 200ms 的 TOV 试验。

3.6.3 低压配电系统中 SPD 的配置方式

低压配电系统中配置 SPD 的基本要求是要将每根带电导体的雷电流都导入大地，因此总是多极 SPD。所谓多极 SPD，是指多于一个保护模式的 SPD 组合，或在结构上是一个完整单元、在电气上互连的 SPD 组合，该组合中的每一个 SPD 称为一个极。低压配电系统中的多极 SPD，依据各级的保护模式和规格参数的不同，有如表 2.14-5 所列的几种组合方式。它们的电路如图 2.14-21~图 2.14-27 所示。

表 2.14-5 低压配电系统中多极 SPD 的配置方式

单相二线系统	单相三线系统 二相三线系统	三相三线系统	三相四线系统
2P 方式 L-PE, N-PE,	3P 方式 L1-PE, L2-PE, N-PE	3P 方式 L1-PE, L2-PE, L3-PE	4P 方式 L1-PE, L2-PE, L3-PE, N-PE
1+N 方式 L-PE, N-PE,	2+N 方式 L1-PE, L2-PE, N-PE		3+N 方式 L1-PE, L2-PE, L3-PE, N-PE
1+1 方式 L-N, N-PE,	2+1 方式 L1-N, L2-N, N-PE		3+1 方式 L1-N, L2-PE, L3-PE, N-PE
对称电路 对称复合电路	—	—	—

注 1. 表中的 2P、3P、4P 方式是指组合中的 2 极、3 极、4 极 SPD，都分别连接在带电导体与 PE 线之间，即都是共模保护，且各极都是同一个型号规格的 SPD。

2. 1+N、2+N、3+N 方式也都是共模保护，但 N-PE 间 SPD 的规格参数与 L-PE 间 SPD 的不同。一般来说，由于 N-PE 间 SPD 的导通频度高，因此放电电流额定值取得大一点，它的 U_c 值按中性线的对地 TOV 电压值来确定。

3. 1+1、2+1、3+1 方式是指各相线上的 SPD 接到中性线（差模保护），而不是接到 PE 线，再在 N-PE 之间接一只 SPD（通常是 GDT 或空气间隙型）。

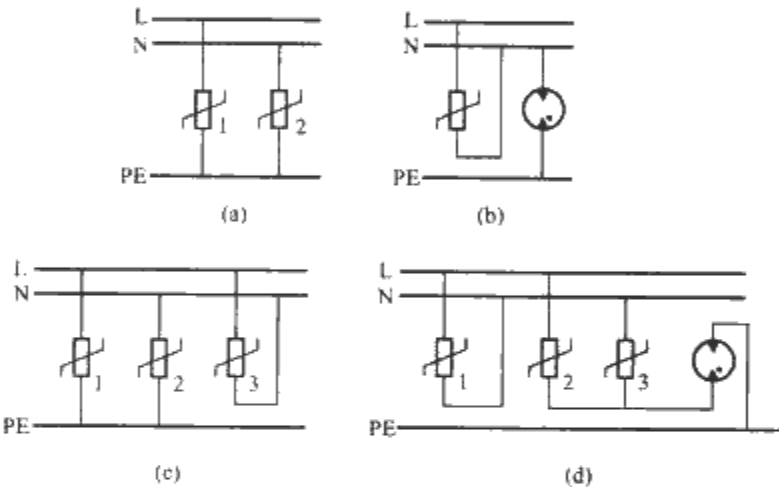


图 2.14-21 单相二线系统 SPD 的配置

(a) 2P (1、2 相同)，1+N (1、2 不同)；(b) 1+1；(c) 对称电路 (1、2、3 相同)；(d) 对称复合电路 (1、2、3 相同)

单相二线系统中的 1+1 方式既有共模保护，又有差模保护，是一种较好的配置，但 L、N 两根线不能接反。在实际工作中这是不能完全避免的，为解决这一问题，同时实现全模式保护，可以采用图 2.14-21 (c) 所示的配置。它实际上是连接成三角形的 3 个完全相同的 MOV 型 SPD，这样一来，三根线可以不加区分地任意连接，但 L-PE 间 SPD 的漏电流易导致它前端的漏电断路器动作。图 2.14-21 (d) 所示的对称复合电路解决了这个问题，得到了广泛使用。

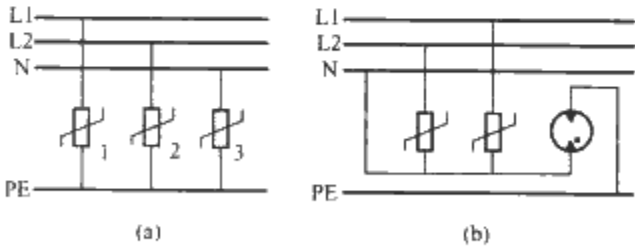


图 2.14-22 单相三线/二相三线系统 SPD 的配置

(a) 3P (1、2、3 相同)，2P+N (1、2 相同，3 不同)；(b) 2+1

对于上面所叙述的 SPD 的配置还需要说明两点：一是 3+1 (包括 1+1 和 2+1) 方式的优缺点，二是 SPD 与漏电断路器 (RCD) 的相对位置。3+1 方式与 4P 方式相比，两者都用了四个模块，成本基本一样。

(1) 3+1 (包括 1+1 和 2+1) 方式的优点。

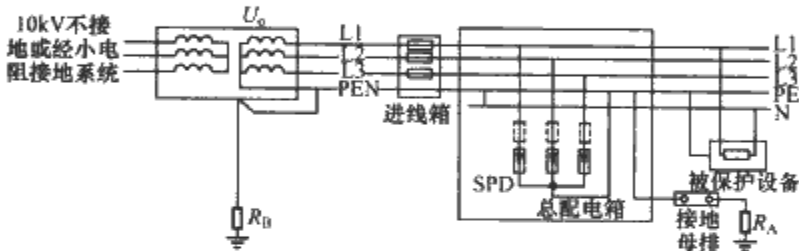


图 2.14-23 TN-C-S 系统中 SPD 的连接 (3P 方式)

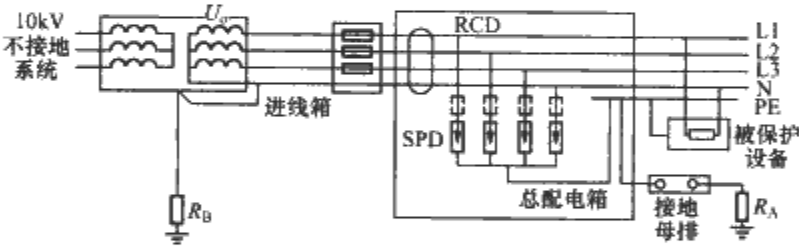


图 2.14-24 10kV 不接地电网，TT 系统中 SPD 的连接 (4P 方式或 3+N 方式，SPD 的上游电源侧有 RCD)

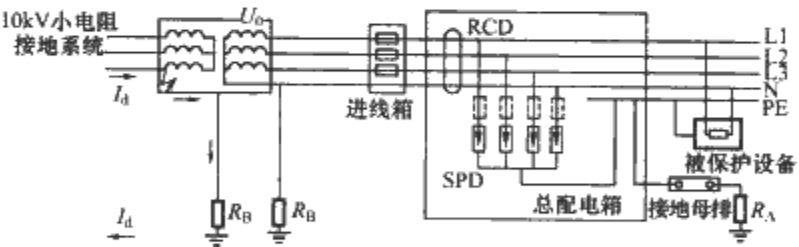


图 2.14-25 10kV 经小电阻接地电网，TT 系统中 SPD 的连接 (变电站低压侧中性点单独设保护接地) (4P 方式或 3+N 方式，SPD 的上游电源侧有 RCD)

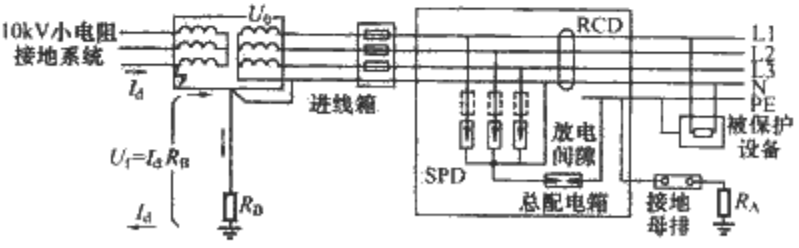


图 2.14-26 10kV 经小电阻接地电网，TT 系统中 SPD 的连接 (变电站只设一个保护接地) (3+1 方式)

1) 3+1 方式既有共模过电压保护，又有差模过电压保护。低压配电系统中 SPD 的配置必须保证每根带电导体上的雷电流入地，因此共模保护是必不可少的，但电网中差模

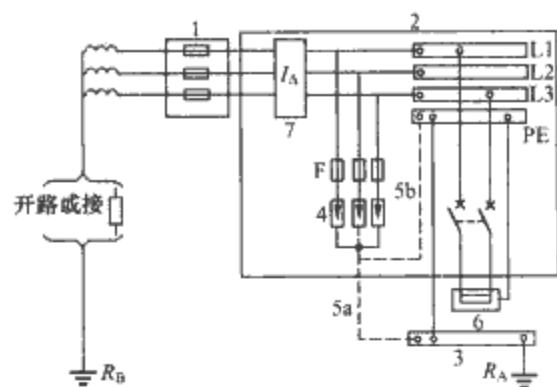


图 2.14-27 IT 系统中 SPD 的连接 (3P 方式)

过电压实际上也总是有的，系统操作过电压主要表现为 L 线与 N 线间的差模过电压，另外，共模 SPD 各极的特性不一致，也会在线间产生差模电压，因此 SPD 的理想配置是既有共模保护，又有差模保护。对于三相系统，4P 方式对差模过电压的抑制作用是极差的，因为 L 线与 N 线之间要经过 2 只 SPD。为改善差模保护性能，可在 4P 配置的基础上，再在 3 根相线与中性线间各装一只 SPD，这就是所谓的 7 模块方式，但这样一来，费用增加很多。3+1 方式是在 3 根相线与中性线间各装一只 MOV 型 SPD，实现了差模保护，又通过 N 线与 PE 线间的 GDT 或空气间隙将雷电流导入大地，实现了共模保护，但总共只用了 4 只 SPD。

2) 3+1 方式的限制电压低。TT 系统 L-N 模式 SPD 的 $U_c \geq 1.15U_0$ ，而 L-PE 模式 SPD 的 $U_c \geq 1.55U_0$ 。这就是说，3+1 方式中 L-N 间 MOV 的压敏电压，可以比 4P 方式中 L-PE 间 MOV 的压敏电压低，因而限制电压也可以相应地降低，而 N-PE 间开关元件的弧光放电电压只有 30~50V，它对 3+1 方式中 L-PE 间限制电压的影响不大。

3) 3+1 方式的安全性好。3+1 方式中 L-N 间 MOV 的失效短路不会在另两个非故障相引起明显的对地过电压，而且，电源可提供足够的短路电流，使保护器件迅速动作而将短路切断。而在 4P 方式中 L-PE 间 MOV 失效短路时，入地短路电流使 PE 线电位升高，可能引起间接接触电击事故，且由于短路电流要通过两个接地电阻返回电源端，其值受到限制而不能被很快切断。为了避免 4P 方式中这类问题的发生，在它的上游电源端加装漏电断路器 (RCD) (如图 2.14-24 所示)，这样当 4P 方式中的 MOV 漏电流增大时，

RCD 动作而将电源切断。但这又带来另一个问题，就是雷电流也可能引起 RCD 误动作，以及 RCD 本身可能承受不了大的雷电流。而在 3+1 方式中，不存在对地漏电流问题，故 SPD 可以安装在 RCD 的上游电源端 (如图 2.14-26 所示)，也避免了雷电流进入 RCD 的问题。

(2) 3+1 (包括 1+1 和 2+1) 方式的缺点。

1) 3+1 方式最大的问题是 N-PE 间的开关特性元件击穿导通后，能否可靠地熄灭续流。正常情况下，N 线上的不平衡电压是远低于开关元件的击穿电压的，因此开关元件不导通。当 N 线上的浪涌电压将它击穿导通后，要使它熄灭，必须有以下两个条件之一：①N 线上的电压低于开关元件的辉光放电电压 (70~150V)；②灌入它的电流小于维持电流，否则，开关元件将持续导通发热，甚至烧毁。这种方式在低压电网稳定，中性线漂移电压小的情况下，是一种理想的配置；在中性线漂移电压严重的电网中使用时要慎重，要有可靠的熄弧措施。

2) 另一个问题是 SPD 中 NPE 模块的通流容量问题。在 3+1 连接方式中，3 根相线和 1 根中性线上的雷电流都要涌入 NPE 模块，因此有的技术规范规定它的标称和最大放电电流是 L-N SPD 的 3 倍，有的规定 4 倍，但实际的 SPD 产品很少能达到这一要求。也有一种意见认为，NPE 模块主要是导通的频度比 L-N SPD 高得多，但电流的峰值未必是 3 倍、4 倍的关系，因此提高 NPE 模块的通流能力的重点应是其重复放电能力，而非其最大峰值。这是个有待进一步验证的问题。

3.7 性能参数和典型产品

3.7.1 电源保护用 SPD 的性能参数

表 2.14-6 按照 GB 18802.1—2002 的规定，汇总了电源保护用 SPD 的主要性能参数。

3.7.2 电源用 SPD 的典型产品

(1) NU6 系列模数结构 SPD (浙江正泰电器股份有限公司)。

1) NU6-I 型：I 级试验的电压开关特性 SPD。一体化模块结构，单极的性能参数见表 2.14-7。

2) NU6-II 型：II 级试验的电压钳位特性 SPD。单极模块的性能参数见表 2.14-8。

表 2.14-6 电源用 SPD 的主要性能参数			
序号	名 称	代号	意 义
1	标称放电电流	I_n	流过 SPD 的波形为 8/20 的电流峰值，用于 II 级试验 SPD 的分级，以及 I、II 级试验 SPD 的限制电压测量和预处理试验
2	冲击电流	I_{imp}	它由电流峰值 I_{peak} 和上升到峰值的时间 $\leq 50\mu s$ ，电荷量 Q ，比能量 W/R 和泄放时间 $\leq 10ms$ 等参数来限定，用于 I 级试验 SPD 的分级和动作负载试验
3	最大放电电流	I_{max}	流过 SPD 的波形为 8/20 的电流峰值，用于 II 级试验 SPD 的动作负载试验
4	最大持续工作电压	U_c	可连续地施加在 SPD 上的最大交流电压有效值或直流电压值
5	连续工作电流	I_c	SPD 的每一保护模式在 U_c 电压下流过的电流值
6	残流	I_{res}	在 U_c 电压下，在 SPD 的 PE 端子测得的电流有效值，测试时 SPD 应按制造方的规定连接，不带负荷
7	等待功耗	P_c	SPD 在 U_c 电压下测得的功耗，测试时 SPD 应按制造方的规定连接，不带负荷，多相电压的相位应平衡
8	电压保护水平	U_p	表征 SPD 限制接线端子间电压的性能参数，其值由制造方从优先值的列表选定
9	电压开关型 SPD 的放电电压	U_{br}	电压开关型 SPD 发生击穿放电前的最大电压值
10	限制电压	U_{da}	施加规定波形和幅值的冲击电流时，SPD 接线端子间测得的最大电压峰值

续表

序号	名 称	代号	意 义
11	暂时过电压	U_T	由制造方规定的大于 U_c 的最大交流电压有效值或直流电压值, 它在 SPD 上施加一段规定时间后, SPD 不发生超过允许值的性能变化, 或者允许 SPD 失效但不会对人身、设备或其他设施造成危险
12	最大短路电流	I_{sc}	SPD 内部功能元件短路时, 能够承受的最大短路电流值 (交流有效值或直流电流值)
13	额定断开续流值	I_{fi}	SPD 本身能切断的最大续流值
14	外壳防护等级 (IP 代码)	IP	表征 SPD 外壳能够提供的防止人体接触内部危险部位, 防止外物或水侵入内部的防护能力的代码
15	多极 SPD 的总放电电流	I_{total}	制造方规定的流过多极 SPD 的 PE/PEN 端子的最大放电电流。(用于检查多保护模式的多极 SPD 在各保护模式同时导通时的累加效应, 主要适用于雷电防护等电位联结目的的 I 级试验 SPD)
16	额定负载电流	I_L	SPD 对其保护端负载输出的额定交流电流有效值或直流电流值
17	电压降	ΔU	SPD 向其负荷端输出额定电阻性负荷电流时, 测出同一时刻的输入电压 U_{in} 和输出电压 U_{sc} , 计算电压降百分数
18	最大短路电流	I_{sc1}	SPD 输出端子短路时, 它能够承受的最大短路电流值 (交流有效值或直流电流值)
19	输出端浪涌耐受性		SPD 的输出端能耐受的来自下游负荷侧的浪涌的能力

注 序号 16~19 项是适用于二端口 SPD 或输入/输出端分开的一端口 SPD 的补充参数。

表 2.14-7 NU6- I 型 SPD 单极模块的性能参数

电流 I_{imp} (kA)(10/350)	电荷量 Q (C)	电压保护水平 U_p (kV)	标称放电电流 I_n (kA)(8/20)	最大持续工作电压 U_c (V)AC
15	7.5	4	50	275, 320, 385, 440
25	12.5	4	60	275, 320, 385, 440
40	20	4	80	275, 320, 385, 440

表 2.14-8 NU6- II 型 SPD 单极模块的性能参数

电流参数(8/20)		电压参数	
标称放电电流 I_n (kA)	5, 15, 25	最大持续工作电压 U_c (V)AC	275, 320, 385, 460, 510, 550
最大放电电流 I_{max} (kA)	15, 40, 60	电压保护水平 U_p (kV)	1.2, 1.5, 1.8, 2.9, 2.5, 3.0

注 1. 分体式模块结构, 基座可防止不同 U_c 模块错插。
2. 有带遥信和不带遥信状态指示两种型号。

3) NU6- III 型: III 级试验的电压钳位特性或混合特性 SPD。最大持续工作电压 U_c (V): 275, 320, 385 三种, 电压保护水平 U_p 均为 1.5kV。组合波开路电压 U_{oc} (kV): 2, 3, 4, 6, 10, 20 六个等级。分体式模块结构, 基座可防止不同 U_c 模块错插。有带遥信和不带遥信状态指示两种型号。

(2) CJP1 系列 (常州市创捷防雷电子有限公司)。CJP1 系列是 MOV 型电压钳位特性 SPD, 其单极模块给出了 I 类、II 类和 III 类试验的参数, 以便使用中根据需要组合。

CJP1 系列单极模块的电压参数和电流参数分别见表 2.14-9 和表 2.14-10。

(3) JD 系列防雷箱和 YD 系列模数结构 SPD (深圳市盾牌防雷技术有限公司)。JD 系列防雷箱和 YD 系列模数结构 SPD, 三相系统采用 3+1 配置, 单相系统采用对称复合电路配置, 以实现共模和差模的全模式保护, 同时对 N-PE 模式的开关特性器件加装过热和过电流脱离装置, 以保证暂时过电压条件下的安全。主要参数见表 2.14-11 和表 2.14-12。

表 2.14-9 CJP1 系列单极模块的电压参数

最大持续交流电压 U_{ac} AC (V)	275	320	385	420	550
最大持续直流电压 U_{dc} DC (V)	359	410	505	560	745
电压保护水平 U_p (kV)	1.2	1.5	1.8	2.0	3.0
MOV 直流参考电压 U_n (V)	430	510	620	680	910

表 2.14-10 CJP1 系列单极模块的电流参数

冲击电流 I_{imp} (kA) (10/350)	3	6	9	12	15	18
标称放电电流 I_n (kA) (8/20)	10	20	30	40	50	60
最大放电电流 I_{max} (kA) (8/20)	20	40	60	80	100	120
5000 次组合波 (kV/kA) (1.2/50-8/20)	4/2	8/4	12/6	16/8	20/10	20/10

表 2.14-11 JD 系列防雷箱主要参数 (U _c =385V)					
标称放电电流 I _n (kA) (8/20)	60	50	40	30	25
最大放电电流 I _{max} (kA) (8/20)	150	125	105	85	65
电压保护水平 U _p (V) (L-N)	2500	2500	2500 (3) 2000 (1)	2500 (3) 1800 (1)	2000 (3) 1800 (1)
电压保护水平 U _p (V) (N-PE)	1200	1000	900	800	700

注 表中 (3) 代表三相, (1) 代表单相, 未加注者为单相、三相都适用。

表 2.14-12 YD 系列模块型 SPD 主要参数								
最大持续交流电压 U _{ac} AC (V)	385	385	385	385	385	320	320	320
标称放电电流 I _n (kA)	35	25	20	15	10	20	15	10
最大放电电流 I _{max} (kA)	80	60	40	25	20	40	25	20
电压保护水平 U _p (V)	1500 ^①	1500 ^①	1500	1500	1500	1400	1400	1400

① 限制电压在 20kA、8/20 下测试, 其余在标称放电电流 I_n (kA) (8/20) 下测试。

3.8 产品选型和安装使用

本节讨论电源用 SPD 的应用问题, 它要解决三个主要课题: 是否需要安装 SPD? 安装怎样的 SPD? 怎样正确安装 SPD? 下面分别进行讨论。

3.8.1 低压配电系统使用 SPD 的必要性

总的来说, 低压配电系统中使用 SPD 是为了满足系统中设备绝缘配合的要求, 技术标准 GB/T 16935.1/IEC 664-1《低压系统内设备的绝缘配合 第1部分: 原理、要求和试验》对此有明确的规定, 该标准规定了直接由低压电网供电的设备的额定冲击电压, 见表 2.14-13。

表 2.14-13 直接由低压电网供电的设备的额定冲击电压					
电气装置的标称电压 (V)		电气设备应具有的耐脉冲过电压值 (kV)			
三相系统	带中点的单相系统	电气装置进线处的设备 (Ⅳ级)	配电回路 (Ⅲ级)	用电器具 (Ⅱ级)	需特殊保护的 设备 (Ⅰ级)
—	120~240	4	2.5	1.5	0.8
230/400 277/480	—	6	4	2.5	1.5
400/690	—	8	6	4	2.5
1000	—	由设计电网的工程师决定			

低压配电系统中由于雷电, 电气系统和用电设备的操作, 以及电气系统故障等原因, 会出现瞬时的或暂时的过电压, 当这种过电压超过了表 2.14-13 所示的设备能承受的额定值时, 就会造成设备的损坏, 因此, 就要用 SPD 将过电压抑制到低于表 2.14-13 的水平, 这是技术上的考虑。但是否安装 SPD, 还要从经济/政治上考虑, 这就是比较设备损坏所造成的直接和间接经济/政治损失与安装 SPD 的费用哪个大。总之, 在决定是否安装 SPD, 以及安装怎样的 SPD 时, 要从技术、经济等多方面综合考虑。

过电压的特性包括电流/电压的峰值、波形、持续时间、包含的能量、出现频度, 以及过电压源对于被保护设备呈现的源阻抗等。在绝大多数情况下它们是随机变量, 只能用统计概率的方法来处理。对于雷击过电压保护的必要性, 则用雷击风险评估的方法来确定。但目前这个评估方法还不成熟, 各个国家和不同行业的规定也不尽相同, 它的技术原理可参看 IEC 62305-2《雷电防护 风险评估》。这里依据 GB 50343—2004《建筑物电子信息系统防雷技术规范》, 简述它的技术思想和用这个方法得出的对 SPD 的规定。

防雷设计总的要求是要满足雷电防护分区, 分级确定的

防雷等级要求。这里的分区是指雷电防护区 LPZ0A, LPZ0B, LPZ1, LPZ2 等。LPZ0A 区是指这样一个空间, 在这个空间内的物体可能遭受直接雷击, 传导全部雷电流。LPZ0B 区内的物体不会遭受直接雷击, 但电磁场没有衰减, 可能传导部分雷电流。LPZ1 区不会遭受直接雷击, 该区内的所有导体中的雷电流比 LPZ0B 区更小, 电磁场被进一步衰减。在 LPZ1 区后的 LPZ2 等后续区, 导体中的雷电流以及电磁场更弱。这里的分级是指依据雷击风险评估确定的雷电防护等级 A, B, C, D。依据分区、分级原则确定的电源线路用 SPD 的标称放电电流 I_n 见表 2.14-14。

表 2.14-14 电源用 SPD 的标称放电电流 I_n						
保护 分级	LPZ0 区与 LPZ1 区交界处		LPZ1 与 LPZ2、LPZ2 与 LPZ3 区交界处			直流电源
	称放电电流 (kA)					
	第一级		第二级	第三级	第四级	
	10/350	8/20	8/20	8/20	8/20	8/20
A	≥ 20	≥ 80	≥ 40	≥ 20	≥ 10	≥ 10
B	≥ 15	≥ 60	≥ 40	≥ 20		直流配电 系统中根据 线路长度和 工作电压选 用标称放电 电流
C	≥ 12.5	≥ 50	≥ 20			
D	≥ 12.5	≥ 50	≥ 10			

四个雷电防护等级 A, B, C, D, 是综合考虑了被保护设备所处位置的电磁环境、设备的重要性和使用性以及设备本身耐受过电压的能力等因素以后划定的。划定这个雷电防护等级所依据的数量指标是防雷装置的拦截效率 E, 见表 2.14-15。参数 E 的定义如下式

$$E = 1 - N_c / N \tag{2.14-11}$$

式中: N_c 为被保护设备可允许的最大年平均雷击次数; N 为被保护设备安装部位的预计年平均雷击次数。

参数 E 的意义可用这个例子来说明: 如果设备允许年雷击 2 次, 安装部位预计年平均雷击 10 次, 那么, 防雷装置应拦截其中的 8 次, 即拦截效率 E=80%。E 的具体计算方法可参看 GB 50343—2004。

表 2.14-15 雷 电 防 护 等 级				
防雷装置的拦截效率 E	E>0.98	0.90<E ≤0.98	0.8<E ≤0.90	E≤0.80
雷电防护等级	A	B	C	D

应当指出,电力、通信、铁道等不同行业,对于按雷电防护分区、分级原则确定的对 SPD 配置的要求并不完全相同,但技术思想一致,这些规定更符合行业的应用实际,是进行 SPD 防雷设计的重要依据。

3.8.2 电源用 SPD 的应用设计和选用

3.8.2.1 工作原则

在进行电源用 SPD 的应用设计和选用时,应贯彻以下原则:

(1) 尽可能符合 SPD 安装现场的实际。SPD 安装现场的实际电磁环境是十分复杂的,要完全把握它是很难的,但要尽可能多地汇集相关资料,包括必要的现场测试,使所设计或选用的 SPD 与之吻合。

(2) 符合相关技术标准的要求。国家的、行业的、企业的相关技术标准,以及 IEC 或其他国际标准,是设计和选用 SPD 的基本依据,应认真消化,正确贯彻。

(3) 认真进行综合平衡。特别是以下两个方面的平衡:一是技术指标之间的平衡,二是技术性能与费用成本之间的平衡,以获得最佳性能价格比。

(4) 确保安全第一。SPD 是安全保护器件,不允许因使用 SPD 而造成新的安全问题,必须确保 SPD 老化和短路失效时没有会导致起火、电击的危险性。

(5) 必须进行验证试验。设计或选用的 SPD 是否正确,必须经过试验来证实,除了实验室的检测试验外,还应尽可能进行现场试验,通过试验来揭示设计或选用中的缺陷,以便修正。

3.8.2.2 应用设计和选用的工作步骤和方法

SPD 的应用设计和选用的工作步骤,是随着任务的不同而不同的,不同的人也有不同的做法,目前还没有一个公认的规范化的方法步骤。在论述这一课题的技术资料中,CECS 174—2004《建筑物低压电源电涌保护器选用、安装、验收及维护规程》的规定比较完整可行,这里列出该标准推荐的方法步骤,并说明几个有关问题。

(1) CECS 174—2004 推荐的方法步骤:

1) 防雷调查。调查内容包括准备安装 SPD 的建筑物及其防雷状况、配电变压器、低压配电系统、被保护设备等的情况,为下一步雷电风险评估和 SPD 设计选用提供依据。

2) 雷电风险评估。通过评估确定是否需要安装电涌保护系统,若需要,再确定该系统的可靠性等级,该标准划分为甲、乙、丙、丁四级,甲级为最高。

3) 确定 SPD 的电压保护水平,SPD 的配置和保护模式。主要考虑三个方面的要素:一是电涌保护系统的可靠性等级;二是配电系统接地制式;三是被保护设备的安装部位及其耐过电压能力和冲击抗扰度等级。

4) 确定 SPD 的试验级别(I、II、III级)及相应的 I_{peak} , I_n , I_{max} , U_{oc} 值。主要考虑三个方面的要素:一是电涌保护系统的可靠性等级;二是配电系统的特征(四种典型情况——架空线;配电线为电缆且配电变压器不在建筑物内;非架空进线,配电变压器在建筑物内且与建筑物共地,线路穿铁管;建筑物无外部防雷装置,电缆进线);三是多级 SPD 的排序(第一级、第二级)。

5) 确定 SPD 的最大持续工作电压 U_c , SPD 的特性和结构类型(钳位型、开关型、组合型等),以及具体型号规格。

6) 进行多级 SPD 之间,以及 SPD 与被保护设备输入电路之间的配合,如不能实现正确的配合,必要时返回到前面的步骤,进行调整。

7) 对于二端口 SPD,检查其最大负载电流能力和电压

变化率。

8) 确定 SPD 内部辅助机构,如脱离器、状态指示器、遥信报警信号、雷电计数器等。

9) 确定 SPD 与外部 RCD 断路器、后备熔断器或断路器的配合。

10) 验证试验,必要时依据试验结果对上述各项进行修正。

(2) 应用设计和选用中几个问题的说明:

1) 关于 SPD 的 U_c ,电压限制元件的电压下限和电压上限。

SPD 应满足三个基本电压关系,下面以 MOV 为例来说明:

第一,SPD 中 MOV 的最大持续工作电压 U_c ,应高于系统中出现概率高的工频过电压,例如,TT 系统 L-PE 模式: $U_c \geq 1.55U_0$ (U_0 为相电压标称值); TT 系统 L-N 模式、TN 系统 L-PE (PEN) 模式: $U_c \geq 1.15U_0$; IT 系统 L-PE 模式: $U_c \geq 1.15U$ (U 为 IT 系统线电压标称值)。

在多数情况下,把 SPD 设计成 L-N 和 L-PE 两种保护模式通用,因此取

$$U_c \geq 1.55U_0 \quad (2.14-12)$$

第二,SPD 中 MOV 的压敏电压下限值 (U_{min}) 不低于 U_c 的峰值,即在 U_c 下,MOV 不导通,可用式 (2.14-13) 表示

$$U_{min} \geq 1.41U_c = 2.19U_0 \quad (2.14-13)$$

第三,SPD 中 MOV 的压敏电压上限值 (U_{max}) 应保证满足电压保护水平 U_p 的要求,即

$$U_{max} R_{cla} \leq 0.8U_p$$

或

$$U_{max} \leq 0.8U_p / R_{cla} \quad (2.14-14)$$

式中: R_{cla} 是 MOV 在标称放电电流时的限压比。

考虑到被保护对象上的电压,是 SPD 的限制电压 U_{cla} 和浪涌电流在连接线上的电压 U_w 之和,并且 MOV 在使用中限制电压会增高,为了确保被保护对象上的电压低于 U_p ,要求初始限制电压 U_{cla} 比要求的电压保护水平 U_p 至少低 20%。

对于 GDT 或空气间隙,它们的冲击击穿电压与直流击穿电压之间的比例关系不像 MOV 那样确定,可按 $0.8U_p$ 确定最大冲击击穿电压,然后按制造厂的技术资料确定最大直流击穿电压。

图 2.14-28 作为一个例子表示了各种电压之间的相互关系。

依据式 (2.14-12) ~ 式 (2.14-14) 所确定的电压是否合理,还需要考虑其他一些因素。就 SPD 而言,总是希望电压保

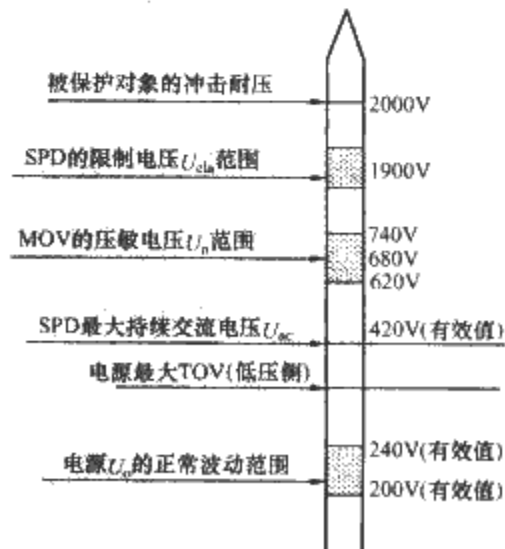


图 2.14-28 MOV 型 SPD 的电压关系 (举例)

护水平(限制电压)低,寿命长,安全性好。但实际上这些要求是相互矛盾的,提高压敏电压有利于寿命和安全性,这是希望的,但其限制电压同时升高,这又是不希望的。

例如:若 SPD 用于 $U_0=220\text{V}$ 的电源中,要求电压保护水平为 1500V ,则从式(2.14-13)算出 $U_{\text{min}} \geq 482\text{V}$,从(2.14-14)式算出 $U_{\text{max}} \leq 500\text{V}$ (假设 $R_{\text{cla}}=2.4$),这就是说,MOV 的压敏电压只能在 $482\sim 500\text{V}$ 之间,只有 18V 的范围,这给实际生产带来困难。为此应进行调整,办法之一是加大 MOV 电阻片的直径,以减小它在 $I_n=20\text{kA}$ 时的限压比 R_{cla} ,例如使它从 2.4 减小到 2.2 ,这样, $U_{\text{max}} \leq 545\text{V}$,压敏电压在 $482\sim 545\text{V}$ 之间,生产起来就容易些。

2) 后备保护设计。在采用 SPD 保护的电源电路中,SPD 短路失效的处理方法有两种:① SPD 内部的脱离器,或与 SPD 直接串联的外部熔断器或断路器将 SPD 切断[如图 2.14-29(a)所示],这时供电没有中断,但对设备的防护作用中断了;② SPD 的短路迫使它上游电源侧的 RCD 或断路器动作[如图 2.14-29(b)所示],这样供电中断,但设备继续得到保护,因为传向设备的浪涌也被切断了。

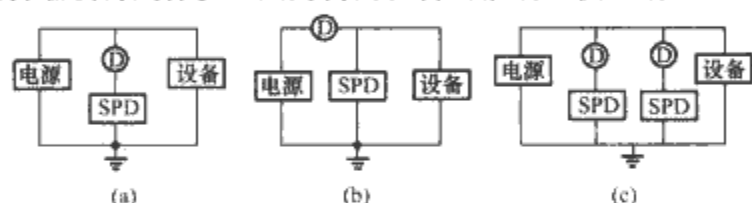


图 2.14-29 后备保护功能的说明
(a) 防护作用中断; (b) 供电中断; (c) 后备保护
D—脱离器

在要求供电高度可靠的场合,既不允许供电中断,也不允许防护作用中断,这时可采用后备保护,即采用两个串联有脱离器(内部的或外部的)的 SPD 并联工作[如图 2.14-29(c)所示]。这样当一个 SPD 失效后,发出告警信号,操作人员进行更换,在此过程中,另一个 SPD 继续起到防护作用。起后备保护作用的那个 SPD 的 U_0 值可选得高一点,使它平时所受的应力小一点,寿命长一点。

3) SPD 的工作寿命。在有些使用场合,要求回答 SPD 能使用多少年的问题,这是一个正在研究的问题。在 SPD 服役过程中承受着系统电压、浪涌电流和温度应力的联合作用,目前还没有一个同时考虑这三个应力综合作用的寿命估算方法,还只能做到系统电压应力下的寿命和浪涌电流应力下的寿命分别单独估算。SPD 在系统电压下的无故障工作年限可通过加速寿命试验来确定,在浪涌电流下的工作年限,对 MOV 型 SPD 而言,可依据 SPD 的能量资源(安秒资源)和安装地点的电磁环境资料来粗略地估算。

4) 多级 SPD 的级间配合。下面讨论什么是多级 SPD,在什么情况下采用多级 SPD,为什么要进行级间配合和怎样进行级间配合等四个问题。

有多个与被保护对象并接的电压限制元件,并且这些电压限制元件之间有隔离阻抗分开的 SPD 称为多级 SPD。多级 SPD 可以是组装在同一外壳/机箱中的 SPD 组合,也可以是空间结构上分开的几个 SPD。几个电压限制元件的直接并联,其间没有隔离阻抗时,仍旧是一级 SPD。图 2.14-30 所示是一个二级 SPD。

多级 SPD 主要用在以下三种场合:① SPD 的安装位置与被保护对象距离较远,超过了 SPD 的保护距离;② 采用一级 SPD 不能将浪涌电压抑制到要求的保护电平以下;③ 被保护对象周围环境中存在有强电磁干扰场。在这几种情况下就需要在紧挨被保护对象的部位再加一级 SPD。后两种情

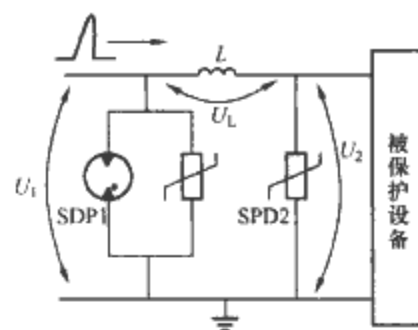


图 2.14-30 二级 SPD

况加装一级 SPD 的必要性是显而易见的,下面对第一种情况做些说明。

对一栋建筑物的供电线路来说,SPD 的安装位置有两个选择:一是在供电线路的入户进线口,二是紧挨被保护设备的位置。从电磁兼容的角度来说,应安装在进线口,以便将雷电流拒之门外,因为雷电流进入室内会带来干扰电磁场和地电位升高等诸多问题。但若被保护设备与进线口 SPD 的距离较远,超过了 SPD 的保护距离,那就有必要在被保护设备的部位加装第二级 SPD。关于保护距离,参看图 2.14-31 的说明。当 SPD 与被保护设备之间的距离 d 足够长时,线路电感 L 与被保护设备的输入电容构成振荡回路,入侵浪涌可在回路中激起振荡,这时被保护设备两端电压 U_2 的峰值可达到 SPD 两端电压 U_1 的 2 倍或更高。被保护设备的输入阻抗高时更易发生这种现象。这时就有必要加装第二级 SPD。一般来说,距离 d 小于 10m 时很少有这种振荡现象。可能出现振荡的距离 d 与 SPD 的类型、系统的类型、入侵浪涌波形陡度,以及负载阻抗等因素有关。

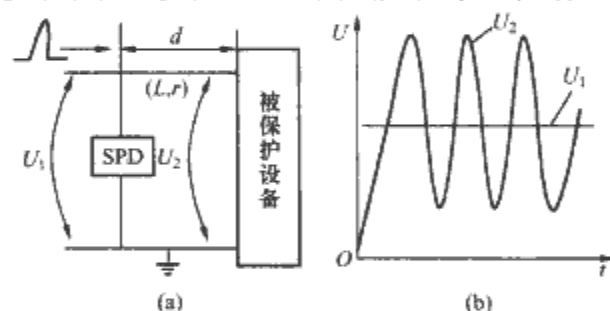


图 2.14-31 SPD 线路中的振荡过电压
(a) 振荡回路; (b) 波形

在多级 SPD 的电路中,各级 SPD 之间的配合是十分重要的,配合不好不仅达不到使用多级 SPD 的目的,还会带来新的安全问题。还有一种情况,看起来是一级实际上是两级 SPD,就是很多被保护设备的内部输入口,已经安装了 SPD 或 MOV,它们与设备外部的 SPD 构成两级电路,所以安装外部 SPD 时应考虑与被保护设备内部的 SPD 或 MOV 的配合。

所谓多级 SPD 的级间配合,就是采取措施,保证入侵浪涌电流从 0 变到 I_{max} 或 I_{peak} 时,多级 SPD 各级的电流和能量,都不超过它们各自的耐受能力。为达到这个目的,各级 SPD 的参数之间要保持一定的关系。一般来说,后级 SPD 的额定电压和残压比前级低,两级之间的残压差是降落在耦合元件上的,如图 2.14-30 中的电感 L 。显然,在这个电路中有下面的关系

$$U_1 = L \frac{di}{dt} + U_2 \quad (2.14-15)$$

$$L = (U_1 + U_2) / (di/dt) \quad (2.14-16)$$

这个电路的工作过程是这样的:在入侵浪涌从零开始上升的波前时间内,SPD2 首先导通,当 SPD2 的残压 U_2 与电流在耦合元件上的电压 $L di/dt$ 之和大于 SPD1 的击穿电压时,SPD1 导通。SPD1 导通后,由于它的阻抗远小于耦合元件的阻抗与 SPD2 的阻抗之和(这里未考虑被保护设备的输入

阻抗), 因此大部分电流涌入 SPD1。若配合不好, 耦合元件不能对浪涌电流提供足够的阻抗, 就会有过多的浪涌电流涌入后级 SPD2 而使它损坏。可见, 这种配合的实质是选用一个合适的耦合阻抗。

在电源电路中, 负载电流相当大, 它流过耦合阻抗所产生的功耗是不容忽视的, 因此一般情况下耦合阻抗用电感而不用电阻。在通信和数据线电路中, 因电流小, 采用电阻的情况比较多。作为耦合阻抗的电感, 可以是实体电感器, 也可以是电缆线的分布电感, 或两者之和。电缆线的分布电感一般按照 $1\mu\text{H}/\text{m}$ 来估算。在一般情况下电压开关型 SPD 与钳位型 SPD 之间有 10m 长的线, 两钳位型 SPD 之间有 5m 长的线, 就可以起到要求的耦合阻抗的作用了。由于电感是频率特性元件, 因此对于它能否起到充分的配合作用, 应以窄波和宽波两种浪涌电流来进行检查。实践表明, 用电感作耦合阻抗来进行配合的方法, 也有诸多问题, 如易产生回路振荡等。

要求级间配合的典型情况有三种: ①前级、后级均为钳位特性电涌保护器; ②前级、后级均为开关特性电涌保护器; ③前级为开关特性, 后级为钳位特性电涌保护器。三种情况所采用的配合方法是有差别的。

实施级间配合所采取的措施有: ①改变 SPD 的特性参数; ②增加级间的线路长度; ③级间串入解耦器; ④采用降低放电电压的触发型间隙。所采取的级间配合措施是否有效, 一般通过以下三种方法来检查: 解析法、计算机仿真法、冲击电流模拟试验法。

3.8.3 SPD 的安装

SPD 的安装, 就是要将它牢靠地固定在设计部位, 同时与电源线路和被保护对象作可靠的电气连接, 并获得设计要求的保护效果, 为此应注意以下事项:

- (1) 安装前应对 SPD 进行认真的检查和必要的测试, 确保所安装的 SPD 是合格的和完好的。
- (2) SPD 宜安装在有隔仓或隔板的配电箱内, 防止它损坏时危及其他器件。
- (3) 正确接线十分重要, 因为出现在被保护对象两端的浪涌电压是 SPD 的残压与连接线上的电压之和。错误的安装常造成连接线上有过高的附加电压, 导致被保护对象两端的总电压超过其耐压水平而损坏。因此安装技术的要点是使得连接线上的附加电压最小, 这个附加电压主要来自两个方面, 一是连接线本身的电流产生的, 二是周围其他电流的磁场在连接线和被保护对象输入端产生的感应电压。为尽可能减小这两种效应, 可采取以下措施:
 - 1) 慎重选择 SPD 的安装部位, 应尽可能远离大功率用电设备、会产生强磁场的设备 (如大功率变压器、电机), 应远离载有大电流的导体, 如与防雷引下线的距离至少要有 2m。
 - 2) SPD 两端的连接导线要尽量短, 一般规定不超过 0.5m, 布线保持平直。
 - 3) 连接导线应有足够的截面积。不同的技术标准对截面积的规定并不相同, 可参考表 2.14-16。

表 2.14-16 SPD 连接线 (铜导线) 的最小截面积

SPD 的标称放电电流 I_n (kA)	80	40	20	10
SPD 连接相线和中性线的导线 (mm^2)	16	10	6	4
SPD 连接地线的导线 (mm^2)	25	16	10	6

4) 尽量采用 V 形连接 (也叫作四线连接或凯文连接)。图 2.14-32 (a) 所示的 V 形连接, 将载有 SPD 放电电流的导体 A、B, 与连接到被保护对象去的导体 a、b 分开, 这就避免了放电电流在连接导体上的电压降被加到负载去。

5) 两连接线不要分开而形成大面积包绕环 [如图 2.14-32 (b) 所示], 而应紧靠在一起, 如能放入一根金属屏蔽管中则更好。

6) SPD 的输出线不要折回来靠向输入线 [如图 2.14-32 (c) 所示], 因为输入线中有大放电电流, 它会在与其邻近的导体中引起感应电压。当 SPD 布线路径上不能避开大电流线时, 应保持与大电流线垂直。

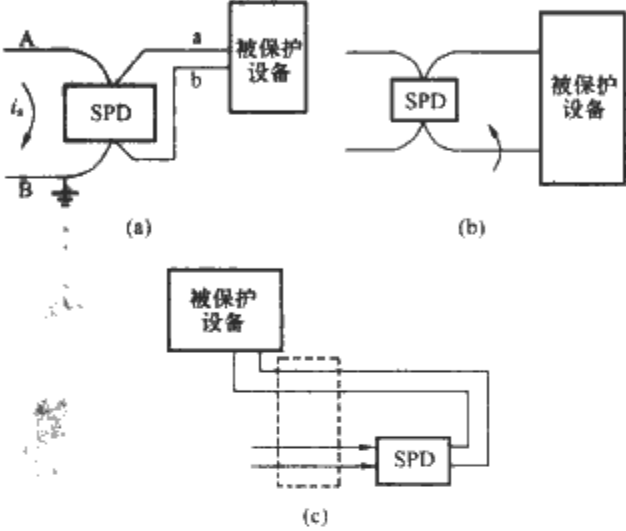


图 2.14-32 SPD 的连接

(a) V 形接线 (正确); (b) 大包绕环 (错误);
(c) 输出/输入间的耦合 (错误)

4 信号用 SPD

今天的人类社会, 到处都是通过各种网络连接在一起的电子装置, 信息流通过电缆、光缆、无线电波等传输媒质在电子装置间传送。较长的传输线中都会有危及电子装置的浪涌电压, 因此一般来说, 在传输线与电子装置连接的端口处, 都要使用信号 SPD。

4.1 信号用 SPD 的特点和类别

4.1.1 信号用 SPD 的特点

与电源用 SPD 相比, 信号用 SPD 有以下特点:

- (1) 电源用 SPD 传送的是能量, 而信号用 SPD 传送的是信息。
- (2) 电源用 SPD 的保护效果是按绝缘配合的要求来评判的, 而信号用 SPD 则是按电磁兼容浪涌抗扰度的要求来评判的。这两个标准的主要差别是: 按绝缘配合标准, 当浪涌入侵时, 只要 SPD 保护对象两端的电压峰值不大于过电压类别所对应的电压值就可以了, 至于进入被保护对象的能量多少是不关心的, 其标准试验波是 1.2/50 电压波; 而浪涌抗扰度标准关心的是浪涌入侵时进入被保护对象的能量, 其标准试验波是 1.2/50-8/20 组合波。为了避免信息技术设备被干扰甚至被破坏, 信号用 SPD 必须将浪涌抑制到被保护设备的浪涌抗扰度以下。一般情况下, 被保护设备的干扰极限值并不知道, 只能按设备所通过的浪涌抗扰度试验等级来考虑。
- (3) 电源用 SPD 只涉及直流或工频交流; 而信号用 SPD 涉及从直流到超高频的各种工作频率, 传送的是模拟或数字量。信号用 SPD 在抑制浪涌的同时, 还不能影响信号的传输。因此传输性能的考核, 对信号用 SPD 很重要。

(4) 信号用 SPD 的工作电压大多比电源用 SPD 的低, 见表 2.14-17。

表 2.14-17 通信线 SPD 的常用工作电压
(具体电压随制造厂商而异)

序号	通信线类型	额定工作电压 (V)	SPD 最高工作电压 (V)	一般速率 (bit/s)	接口类型
1	DDN/X.25/帧中继	<6, 或 40~60	18 或 80	2M 以下	RJ/ASP
2	XDSL	<6	18	8M 以下	RJ/ASP
3	2M 数字中继	<5	6.5	2M	同轴 BNC
4	ISDN	40	80	2M	RJ
5	模拟电话线	<110	180	64k	RJ
6	100M 以太网	<5	6.5	100M	RJ
7	同轴线缆以太网	<5	6.5	10M	同轴 BNC 同轴 N
8	RS232	<12	18		SD
9	RS422/485	<5	6	2M	ASP/SD
10	视频线	<6	6.5		同轴 BNC
11	工业现场控制	<24	27		ASP

(5) 信号用 SPD 的工作电路的阻抗比电源电路要高得多, 浪涌电流/电压的量值通常比较小, 因而气体放电管 (GDT), 雪崩击穿二极管 (ABD) 和晶闸管浪涌抑制器 (TSS) 等元件在信号用 SPD 中用得较多。由于电路阻抗高, 短路失效所引起的燃烧和电击危险性很小, 因此大多信号用 SPD 中没有脱离器。

尽管信号用 SPD 相对于电源用 SPD 有诸多特点, 但它作为 SPD 的许多共同特征, 与电源用 SPD 是基本相同的, 如: 最大持续工作电压, 最大限制电压和电压保护水平, 最大/标称放电电流和冲击电流寿命, 按防雷保护区的概念实施分级保护, 以及级间能量配合等。

4.1.2 信号用 SPD 的分类

信号用 SPD 目前尚无统一的分类方法, 下面列举的是几种常见的分类法:

(1) 按试验波形分类。按 10/350 波标定的信号用 SPD 称为雷电流 SPD, 而按组合波和 8/20 波标定的信号用 SPD 称为浪涌 SPD。

(2) 按传输的信号分类。按所传输信号的特点分为音频线路用 SPD、视频线路用 SPD、高频线路用 SPD 和数据线用 SPD 等。

(3) 按安装位置分类。根据安装位置的不同分为固定连接装置中的 SPD, 插头/座中的 SPD 和设备输入口的 SPD 等三类。

(4) 按应用分类。信号用 SPD 的应用场合很多, 要求各异, 就大类而言有通信网络用 SPD、现场总线用 SPD、测量/控制用 SPD、馈线接口 SPD 等。在通信系统中按用途分为以下四类:

- 1) 网路及监控用 SPD: 包括以太网、RS232、RS485、RS422 等不同协议和物理接口类型。
- 2) 传输及接入信号用 SPD: 包括 2Mbit/s 口、专用时基信号接口、保安单元等。
- 3) 馈线接口用 SPD: 包括移动通信、小型微波、VAST 接受站等。

4) 电源/信号组合 SPD: 包括视频头、固定无线接入系统综合保护器等。

(5) 按所连接的传输媒质分类。按所连接的传输媒质分为双绞线用 SPD、同轴电缆用 SPD。

(6) 按电路结构分类。GB 18802.21—2004/IEC 61643-21:2000 中, 把信号用 SPD 划分为在同一外壳中只有电压限制元件而没有电流限制元件的 SPD [如图 2.14-33 (a)、图 2.14-33 (b) 所示], 和在同一外壳中既有电压限制元件又有电流限制元件的 SPD [如图 2.14-33 (c) 所示] 这两大类, 而前者还可进一步细分为含有串联线性元件 [如图 2.14-33 (a) 所示] 和不含串联线性元件 [如图 2.14-33 (b) 所示] 这两个品种。

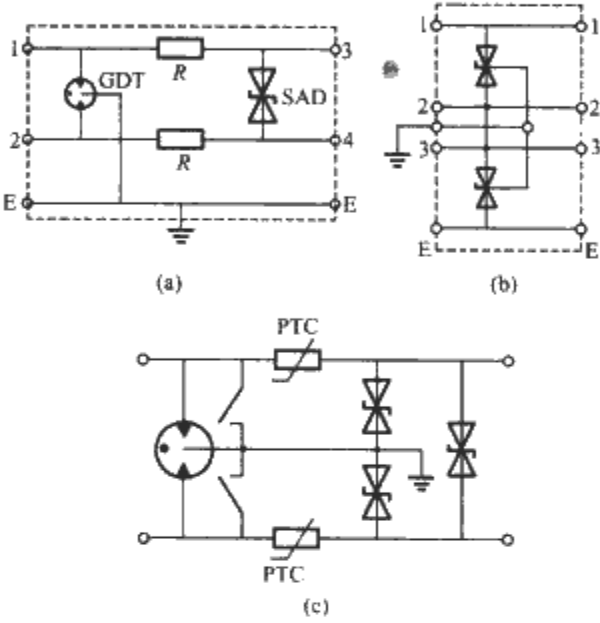


图 2.14-33 信号用 SPD 电路类型

(a) 电压限制元件+串联线性元件;
(b) 电压限制元件; (c) 电压/电流限制元件

4.2 信号用 SPD 的结构

4.2.1 信号用外部结构形式

图 2.14-34 表示了信号用 SPD 的五种常见外部结构形式。

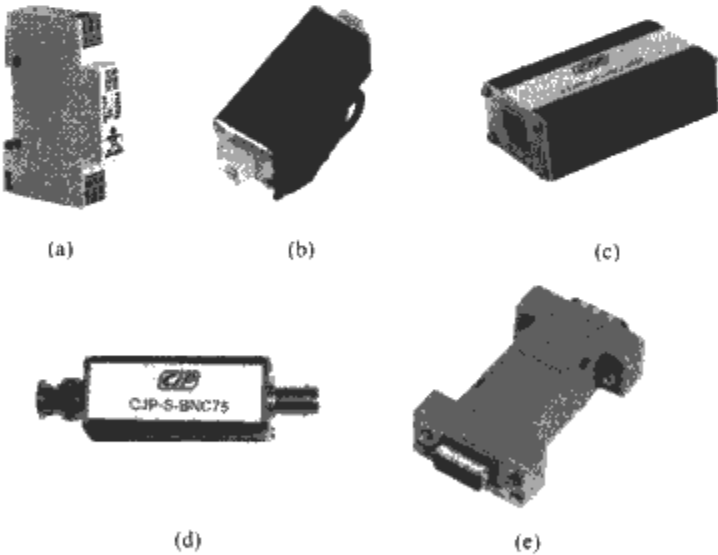


图 2.14-34 信号用 SPD 的外部结构形式

(a) 标准导轨安装, 模数化模块, 接线端子连接;
(b) 铝合金外壳, 接线端子连接; (c) 铝合金外壳, RJ11 接口; (d) 铝合金外壳、BNC 同轴接头; (e) 塑料外壳、D 形连接器

4.2.2 连接信号 SPD 的传输线

与信号 SPD 连接的传输线主要是双绞线和同轴电缆, 它们的特性应与 SPD 相配合。这两种传输媒介如图 2.14-35 所示。

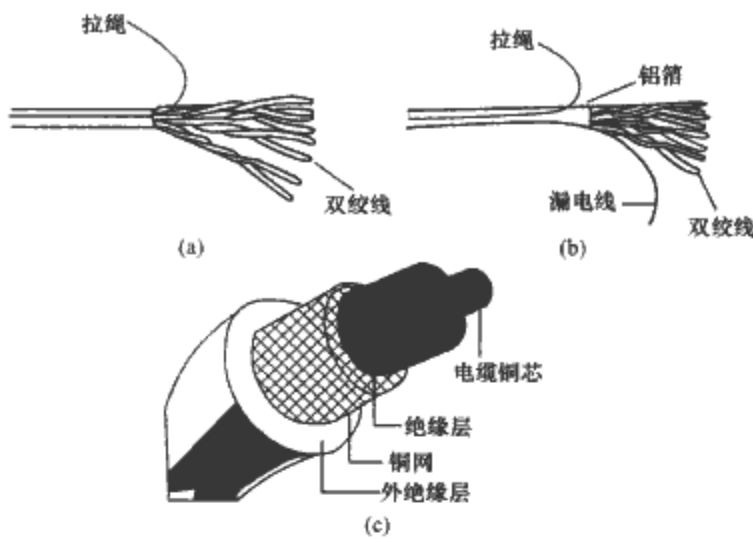


图 2.14-35 连接信号用 SPD 的传输线
(a) 非屏蔽双绞线；(b) 屏蔽双绞线；(c) 同轴电缆

(1) 双绞线。它是由两根带有绝缘保护层的铜导线按一定密度互相绞缠所形成的线对组成。这种结构能有效地减小导线间的电磁干扰。2 对、4 对，或更多对双绞线可捆成一条电缆，外面用护套包裹，称为双绞线电缆或双扭线电缆。双绞线的分类有以下几种：

1) 按特性阻抗分为：100Ω，120Ω，150Ω 三种。

2) 按结构分为四类：非屏蔽双绞线 (UTP)，包铝箔屏蔽双绞线 (FTP)，包铝箔加铜编织网的屏蔽双绞线 (SFTP)，每对芯线和电缆包铝箔加铜编织网的屏蔽双绞线 (STP)。

3) 按线对数分类：8 芯 4 对，50 芯 25 对，100 芯 50 对，200 芯 100 对。

4) 按传输频率分 6 类 (类别越高，传输频带越宽)。

双绞线的性能参数有：特性阻抗、结构回波损耗、近端串扰、远端串扰、衰减、衰减串扰比、传输延时以及直流电阻等。

(2) 同轴电缆。同轴电缆的结构如图 2.14-35 (c) 所示。它以硬铜线为芯，称为内导体，外面是一个空心铜质圆筒，是密织的网状导体，称为外导体。内/外导体之间及与外界之间用绝缘材料隔开，内/外导体的轴线重合。

依据传输频带的不同，同轴电缆分为基带同轴电缆和宽带同轴电缆。基带同轴电缆的特性阻抗 50Ω，用于数字传输。宽带同轴电缆特性阻抗 75Ω，用于模拟传输。

按直径的不同，同轴电缆分为细缆和粗缆。细缆一般以总线型结构在网络中出现。粗缆适用于比较大的局域网的布线。

同轴电缆的性能参数有：特性阻抗、衰减、传播速度和直流回路电阻等。

(3) 信号 SPD 的标准接口。标准接口是信号 SPD 的重要配件，用来将 SPD 与传输线和被保护设备相连接。信号用 SPD 的五种常用接口如图 2.14-36 (单位 mm) 所示。

4.3 信号用 SPD 的内部电路和性能参数

4.3.1 信号用 SPD 的内部电路

随着使用要求的不同，信号用 SPD 的内部电路也多种多样。图 2.14-37 给出了测量和控制系统用 SPD 的几种电路，它们大同小异，依据不同的用途可以有几十个品种，都做成标准模块。图中只画出了一对线，使用中可以有好多对，甚至几十对这样的线路组合在一起。下面对这些电路作一些说明。

(1) 保护模式。图 2.14-37 (a) 所示电路只有共模保护，它适用于两条线是单线的情况，因而没有必要抑制线间过电压。图 2.14-37 (b) 所示电路只有差模保护，它适用于

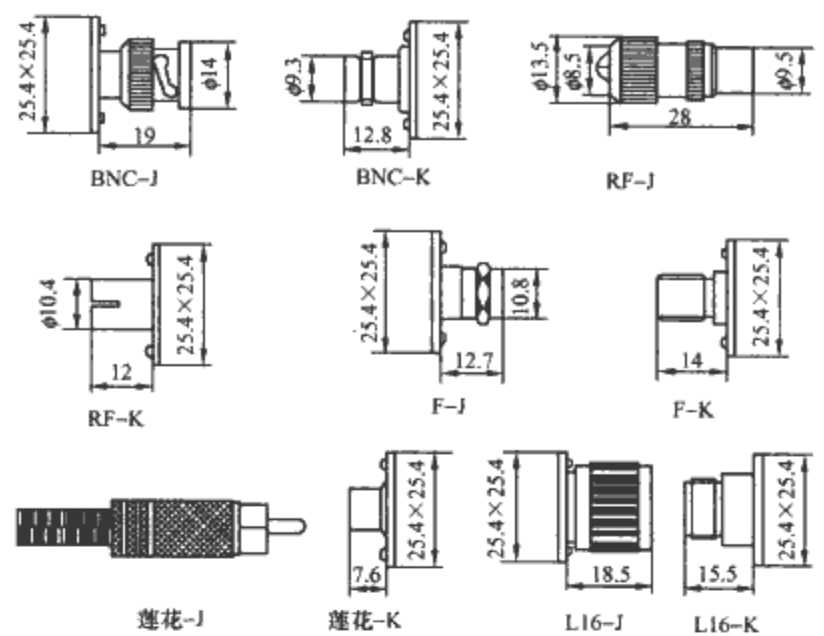


图 2.14-36 信号用 SPD 的五种常用接口

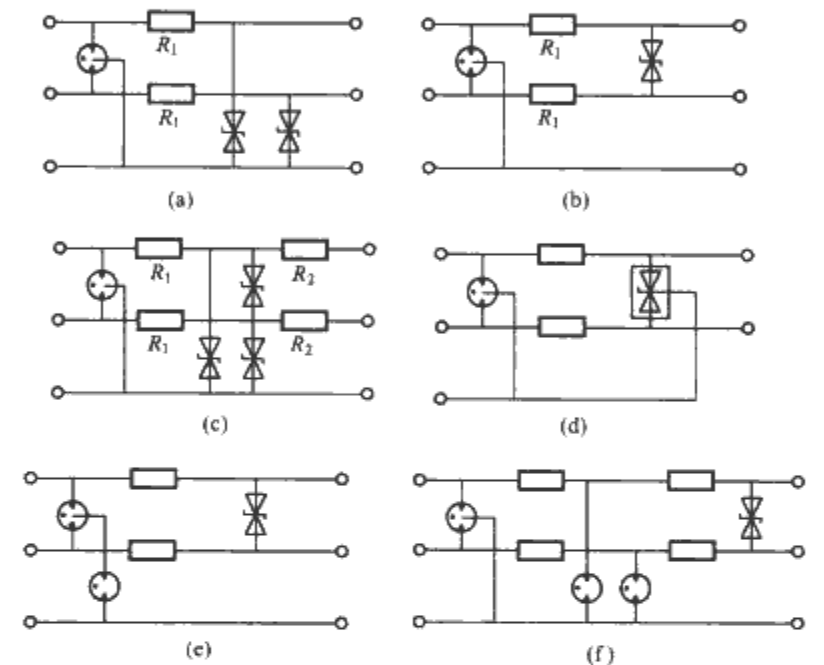


图 2.14-37 测量和控制系统用 SPD 的几种电路

(a) 电路 1；(b) 电路 2；(c) 电路 3；
(d) 电路 4；(e) 电路 5；(f) 电路 6

两条线是对线的情况，抑制线间过电压是主要的。

(2) 图 2.14-37 (c) 所示电路兼有共模和差模两种保护，图中的电阻 R_2 是考虑到与被保护负载的输入电路相配合而设置的，这种负载的输入端已有压敏电阻保护，因此 SPD 与之连接时其间必须有隔离耦合元件，否则就不能实现配合。

(3) 图 2.14-37 (d) 所示电路中，对各元件的电容量和频率特性进行了专门选择，使得 SPD 的频率特性符合要求。

(4) 图 2.14-37 (e) 所示电路对地具有高的耐电压，用于专门的安全电路。

(5) 图 2.14-37 (f) 所示电路是 I 级试验和 II 级试验组合在一起的组合型 SPD，它的安装位置可能遭受部分直接雷电流，因此按每条线承受 2.5kA-10/350 电流设计，且要达到一个较低的保护水平。

4.3.2 信号用 SPD 的特性和参数

按照 GB 18802.21—2004/IEC 61643-21，对信号用 SPD 的技术要求有电气要求——电压限制性能 (8 项)、电流限制性能 (8 项)、传输性能 (6 项)，以及机械要求 (5 项) 和环境要求 (3 项)，共 30 项。

4.3.2.1 电压限制性能

(1) 最大持续工作电压 U_c 。最大持续工作电压指由制造厂规定的可以连续加在 SPD 上的最大直流电压或交流电

压峰值，通过测量在该电压下的绝缘电阻来验证其符合性。

(2) 绝缘电阻。以最大持续工作电压 U_c 测得的电阻值，不应小于规定值。(为了与电源用 SPD 的一致，最好用漏电流指标来代替这个绝缘电阻指标，以免与外壳的绝缘电阻指标相混淆)

(3) 冲击限制电压。以表 2.14-18 中 C 类别等效输出阻抗为 2Ω 的 1.2/50-8/20 组合波测量限制电压，组合波的开路电压 U_{oc} 依据 SPD 的能量耐受能力从 0.5kV, 1.0kV, 2.0kV, 4.0kV, 10kV 中选取，正/反向各加 5 次冲击，10 次冲击中的最高限制电压不应超过规定的保护电平 U_p ，冲击的间隔时间应保证各次试验没有热累积。试验时 SPD 不带负载。

对于含有 GDT 的 SPD，还要用 $1kV/\mu s$ 的电压波进行测试，短路电流为 $10/1000\mu s$ ，幅值依据 SPD 的能量耐受能

力从 10A, 25A, 100A 中选取，方法和要求同组合波测试。

(4) 冲击恢复时间（仅适用于电压开关特性 SPD）。SPD 在施加正常工作电压/电流的条件下，同时施加规定的与正常工作电压同极性的冲击，则从施加冲击开始到 SPD 恢复到高阻抗状态的时间不超过 30ms。冲击的波形按应用要求从表 2.14-18 的 B、C、D 类波中选取，冲击的幅度应使电压开关元件动作。正/反极性的冲击各进行 3 次试验，间隔时间不超过 1min。

(5) AC 耐久性。工频交流电源通过一串联电阻后加给 SPD，串联电阻调整到短路电流等于从表 2.14-19 选定的某个数值，电源的开路电压应能使 SPD 充分导通，施加的次数按表 2.14-19 的规定进行。试验后的绝缘电阻，冲击限制电压，冲击恢复时间和串联线性阻抗等仍应合格。

冲击试验的电压/电流波				
类别号	试验类型	开路电压 U_{oc}	短路电流 I_{sc}	施加次数
A1	极慢升速	$\geq 1kV$ ，升速 0.1~100kV/s	10A，升速 0.1~2A/ μs $\geq 1000\mu s$ （宽度）	单个周期
A2				
B1	慢升速	1kV，10/1000	100A，10/1000	300
B2		1kV，或 4kV，10/700	25A，或 100A，5/300	300
B3		$\geq 1kV$ ，100V/ μs	(10, 25, 100) A，10/1000	300
C1	快升速	0.5kV 或 1kV，1.2/50	0.25kA 或 0.5kA，8/20	300
C2		(2, 4, 10) kV，1.2/50	(1, 2, 5) kA，8/20	10
C3		$\geq 1kV$ ，1kV/ μs	(10, 25, 100) A，10/1000	300
D1	高能	$\geq 1kV$	(0.5, 1, 2.5) kA，10/350	2
D2		$\geq 1kV$	1kA，或 2.5kA，10/250	5

注 1. 冲击加在线路端子与公共端子间。线路端子之间是否试验，依据适用性确定。
2. 此表摘自 GB 18802.21—2004。

AC 耐久性试验优先值											
短路电流 (A)	0.1	0.25	0.5	0.5	1	1	2	2.5	5	10	20
持续时间 (s)	1	1	1	30	1	1	1	1	1	1	1
施加次数	5	5	5	1	5	60	5	5	5	5	5

注 AC 电压加在线路端子与公共端子间。线路端子之间是否试验，依据适用性确定。

(6) 冲击耐久性。用测试限制电压同样的脉冲，按表 2.14-18 规定次数的进行冲击，其中一半为正向，一半为负向，冲击的间隔时间应保证各次试验没有热累积。试验后的绝缘电阻，冲击限制电压，冲击恢复时间和串联线性阻抗等仍应合格。

(7) 过应力失效模式。制造厂应提供能造成 SPD 失效的 8/20 冲击电流和交流电流的数值，但这种失效应是安全的，即不会产生起火、爆炸、电击等危险，也不会喷出有毒有害的气雾。过应力失效模式有以下几种：

1) 模式 1。SPD 的电压限制部分已断开，已没有电压限制功能，但线路仍能工作。

2) 模式 2。SPD 的电压限制部分被 SPD 内部的一个低阻抗短路，线路不能工作，但设备为短路所保护。

3) 模式 3。SPD 的内部，在电压限制部分的网络侧开路，线路不能工作，但设备为线路的开路所保护。

试验时首先进行 8/20 电流过应力试验，从制造厂规定的电流 i_n 开始，按下式的规定逐级提高电流

$$i_{test} = i_n(1 + 0.5N) \quad (2.14-17)$$

N 从 0 开始，每次加 1，直到 SPD 出现失效，如果 $N=6$ 仍

未出现失效，则进入 AC 过应力试验。以制造厂规定的工频电流施加 15min，电压值应能使 SPD 充分导通。试验结束后 SPD 的安装基座应能装入另一个 SPD（未严重损坏）。

(8) 盲点。盲点是指多级 SPD 中的这样一种情形：当将一个高于最大持续工作电压 U_c 的电压加在多级 SPD 上时，不是所有各级都动作，有的级不导通。这种情况有可能造成 SPD 中有的元件过应力，因此应进行检查。方法是用测量限制电压的冲击电流，找出盲区的最高脉冲电压幅值，然后以这个幅值，正/反各冲击两次，试验后检查绝缘电阻是否合格。既然盲点是多级 SPD 中有的级不动作，因此盲点的限制电压波形，与所有各级都动作时的限制电压波形不会一样，利用这一点，就可以找到盲区的最高脉冲电压幅值。

4.3.2.2 电流限制性能

在电流限制性能的试验中，SPD 的输出端是短路的，使得电流流过电流限制元件或串联线性阻抗；而在电压限制性能的试验中，SPD 的输出端是开路的。

(1) 额定电流。额定电流即 SPD 中的电流限制元件或串联线性阻抗能承受的最大连续工作电流。以这个电流试验 1h，电流限制元件不应动作，SPD 的可接触部分的温度不

超过规定值,性能不应发生变化。

(2) 串联电阻。制造厂应规定串联电阻值及其公差。

(3) 电流响应时间。电流响应时间指当一个高于额定电流值的电流流过 SPD 时,SPD 的电流限制元件动作所需的时间。

试验电流为额定电流的 1.5, 2.1, 2.75, 4.0 倍和 10 倍,但不超过电流限制元件的最大耐受电流。

试验时首先加额定电流,待样品达到热稳定后电流升到试验电流,并开始计算时间,直到电流下降到额定值的 10% (表明电流限制元件已动作),这个时间不应超过规定值。

(4) 电流恢复时间。电流限制元件动作后,当电流回到额定值后,电流限制元件恢复到静态所需的时间即为电流恢复时间,不应超过 120s。

(5) 最大断路电压。最大断路电压指允许加在 SPD 上的最高电压,它在 SPD 的电流限制元件动作后保持 1h,电流限制元件不应有性能下降现象。该电压可等于或高于 SPD 的 U_c 。

(6) 动作负载试验。该试验考核 SPD 的电流限制元件承受重复的最大断路电压的能力。试验电源的输出电压调整到最大断路电压,短路电流调整到规定值。将试验电源加到 SPD 上,待电流限制元件动作,电流下降到额定值的 10% 后,切断电源 2min,或待电流限制元件恢复到静态,如此为工作一次,待达到试验规定次数后,电流限制元件的串联电阻和电流响应时间仍应合格。

(7) AC 耐久性。该试验考核 SPD 的电流限制元件承受重复的规定电流的能力。试验电源的输出电压不超过最大断路电压,短路电流调整到规定值,施加规定的时间和规定的次数 (在该试验中电流限制元件不动作)。试验后,电流限制元件的额定电流、串联电阻和电流响应时间仍应合格。

(8) 冲击耐久性。该试验考核 SPD 的电流限制元件承受重复的规定冲击的能力。冲击电流的优先值见表 2.14-20。

表 2.14-20 冲击电流的优先值

开路电压	1kV	1.5kV, 10/700	最大断 路电压	最大断 路电压	4kV, 1.2/50
短路电流	100A, 10/1000	37.5A, 5/300	25A, 10/1000	ITU-T, 建议 K17	2kA, 8/20
施加次数	30	10	30	10	10

4.3.2.3 传输性能

GB 18802.21—2004/IEC 61643-21:2000 提出的六项表征传输特性的参数,它们的适用性要通过仔细分析 SPD 所接入的系统来决定。表 2.14-21 可供参考。

表 2.14-21 适用传输试验项目的性能

传输试验	模拟系统 (<20kHz)	数据系统	视频系统
电容量	*	*	*
插入损耗	*	*	*
回波损耗		*	*
纵向平衡	*	*	*
误码率 (BER)		*	
近端串扰 (NEXT)	*	*	*

* 表示适用。

(1) 电容量。在 SPD 的规定端子间测量电容量,信号

发生器的频率为 1MHz,电压 1Vr.m.s,当对一对端子进行测量时,其他端子连接在一起后接到信号发生器的地端。测试时不加直流偏压,但要注意,有些 SPD 的电容量是随直流偏压而变的。在某些应用中,一对通信线中只有一根线上有直流偏压,这可能导致电容量的明显不平衡。

(2) 插入损耗。SPD 接入传输线所产生的信号功率损耗,等于以分贝 (dB) 数表示的 SPD 接入前后的功率比

$$D = 10\lg(P_1/P_2) \tag{2.14-18}$$

式中: D 为插入损耗, dB; P_1 和 P_2 分别是当不接入 SPD 和接入 SPD 时,在传输系统的 SPD 接入部位测量得到的向负载端传输的功率。

推荐的测试信号的大小为 -10dBm。测试信号频带应是 SPD 预定使用的工作频带。

(3) 回波损耗。SPD 接入传输线将在接入点引起信号的回波反射,回波损耗等于以分贝 (dB) 数表示的反射系数矢量倒数的模。

注意:信号传输线的间断点,或者说阻抗突变点 (在这里是指 SPD 的接入点),将产生信号的回波反射,反射电压对于入射电压之比称为反射系数 (F)。若间断点向信号源端看的阻抗为 Z_1 ,间断点向负载端看的阻抗为 Z_2 ,则反射系数 F 可表示为

$$F = (Z_1 - Z_2)/(Z_1 + Z_2) \tag{2.14-19}$$

于是,回波损耗为 $20\lg\text{MOD}[(Z_1 + Z_2)/(Z_1 - Z_2)]$,推荐的测试信号的大小为 -10dBm。测试信号频带应是 SPD 预定使用的工作频带。

(4) 纵向平衡。纵向平衡是一个用来表示一对或多根平衡线路的对称性的量,它反映了平衡线路对于共模干扰的敏感度。若加在 SPD 平衡线路上的共模干扰电压 (即纵向对地电压) 为 U_s ,由此而产生的 SPD 差模电压为 U_m ,则纵向平衡等于电压比 (U_s/U_m) 的分贝数可表示为 $20\lg(U_s/U_m)$ 。

除非另有规定,一般对于模拟信号电路用 SPD,测试频率为 200Hz、500Hz、1000Hz 和 4000Hz;对于数据信号电路用 SPD,测试频率为 5kHz、60kHz、160kHz 和 190kHz。若 SPD 的纵向平衡与直流偏压有关,则应在 SPD 的每个端子上施加规定直流电压的条件下进行测量。SPD 的纵向平衡与其串联电阻的匹配程度密切相关。

(5) 误码率 (BER)。误码率是在规定时间间隔内,通过 SPD 传送后的错误码元数 (比特) 与传输的总码元数之比,它是数字通信系统可靠性的量度。

(6) 近端串扰 (NEXT)。近端串扰指由于 SPD 的接入而引起的一个线路的信号耦合到另一个线路的信号量。测试时在 SPD 的一个通道施加平衡干扰信号,在受干扰通道的靠近干扰施加端测量感应信号。推荐的测试信号的大小为 -10dBm。测试信号频带应是 SPD 预定使用的工作频带。

4.4 信号用 SPD 的选用和安装

总的来说,3.8 节所叙述的关于电源用 SPD 的选用和安装的原则和方法,对信号用 SPD 也是适用的,但必须考虑信号用 SPD 的特点。与电源用 SPD 的选用相仿,在具体选用信号 SPD 以前,首先必须在考虑安装地点电磁环境的基础上确定 SPD 的测试类别,在考虑被保护设备冲击抗扰度的基础上确定 SPD 的保护水平,在考虑被保护设备技术类型的基础上确定 SPD 的配置,然后才能设计或选用 SPD 的结构形式和内部电路。

4.4.1 测试类别的选择

GB 18802.21—2004 规定了 10 种信号用 SPD 的测试类别（见表 2.14-18），供 SPD 的使用方和生产方依据具体使用环境和要求选用，标准并未给出具体规定。一般来说，试验波形及其严酷度（即电流/电压值）是依据信号用 SPD 安装部位的防雷保护分区，以及浪涌进入的耦合机制来确定的。

对 LPZ0B/LPZ1 区界面的 SPD，选用表 2.14-18 的 D1、D2、B2 试验波，对 LPZ1 区/LPZ2 区界面的 SPD 选用 C2、B2 试验波。耦合机制对测试类别选择的影响见表 2.14-22。表中，电阻传导的一种方式雷电流流过接地电阻使地位升高，从而向信号用 SPD 引入浪涌电压。

对于信号用 SPD 的测试类别及其严酷度，一些行业标

准有更明确而具体的规定。这些规定是该行业实践的总结，应予以遵守。表 2.14-23 的测试类别及其严酷度引自我国信息产业部标准 YD/T 1429—2006《通信局（站）在用防雷系统的技术要求和检测方法》。

4.4.2 信息设备的冲击抗扰度

低压配电系统中的设备，已有一个全球基本统一的冲击电压耐受类别（见表 2.14-13），作为电源用 SPD 的选用依据。但对信息通道的冲击抗扰度来说，还没有类似的规定，因此最好通过具体测试来确定设备能耐受的冲击抗扰度。由于信息通道冲击抗扰度测试的电流/电压比较小，设备比较简单，价格低廉，这一测试是普遍可行的。表 2.14-24 列出的冲击抗扰度水平可供选用信号 SPD 时参考。

表 2.14-22 按耦合机制选择信号 SPD 的测试类别

干扰源	直接雷击		近处雷击		远处雷击	交流电源影响
耦合形式	电阻传导	感应	电阻传导	感应	感应	电阻传导
电压波形	—	1.2/50	—		10/700	50/60Hz
电流波形	10/350	8/20	10/350	8/20	—	—
测试类别	D1	C2	D1	C2	B2	A2

表 2.14-23 标准 YD/T 1429—2006 规定的测试波及其严酷度

测试波形	信号用 SPD			天馈线用 SPD		
	H 型(高)	M 型(中)	L 型(低)	H 型(高)	M 型(中)	L 型(低)
$I_n(8/20)$	$\geq 5\text{kA}$	3kA	$\geq 50\text{A}$	$\geq 10\text{kA}$	5kA	$\geq 3\text{kA}$
$I_{\text{max}}(8/20)$	$\geq 10\text{kA}$	5kA	$\geq 100\text{A}$	$\geq 20\text{kA}$	10kA	$\geq 5\text{kA}$
U_{oc} (组合波)	$\geq 10\text{kV}$	6kV	$\geq 100\text{V}$	$\geq 20\text{kV}$	10kV	$\geq 6\text{kV}$

表 2.14-24 通信信息交换设备冲击抗扰度要求

适用范围	接 口		波 形	发生器等效阻抗(Ω)	浪涌水平(kV)	合格判据
交换设备	局端口	无一次保护	10/700 μs	25	1	A
		有一次保护	10/700 μs	25	4	A
		配线架	10/700 μs	25	4	A
	用户终端	无一次保护	10/700 μs	25	1.5	A
		有一次保护	10/700 μs	25	4	A
	电源接口		组合波	2/12	0.5	A
	模拟用户口		10/700 μs	25	4	A
	ISDN-BRA 口		10/700 μs	25	4	C
	ADSL 口		10/700 μs	25	4	B
	连接双绞线的 2048kbit/s 口		组合波	12	0.5	C
	以太网口		组合波	12	0.5	B
	V24 口, V25 口		组合波	12	0.5	C
	连接同轴线的传输设备支路口 2048kbit/s 口, ISDN-PRA 口等		组合波	2	0.5	C
	直流电源口		组合波	2/12	0.5	A
	交流电源口		组合波	2/12	6	A

注 1. 判据 A——设备能经受住规定的测试而无损坏和出现其他紊乱(如软件无法正常运行,故障保护部件误动作),且测试后设备在规定的范围内能正常运行。在测试期间不要求设备能正常运行。
2. 判据 B——长度为 1500B 的数据包能正常传输,且 5min 内不出现丢包。
3. 判据 C——试验后 5min 内不出现误码现象或通话恢复清晰。

4.4.3 信号用 SPD 的配置

在通信系统中信号 SPD 的配置已有比较成熟的规定，见表 2.14-25。在测量控制系统、现场总线系统中、目前

尚未有这样的典型配置方案，需要依据一般的工作流程来确定。在考虑信号的具体电路和参数时，要注意以下几点：

表 2. 14-25 通信系统中信号 SPD 的配置

线 型		SPD 安装要求	SPD 性质	放电电流		环 境	局站类别	雷暴日 (天)
				标 称	最 大			
网路数据线	楼内用户线 >50m	一端安装	GDT+ABD 或 ABD	≥3kA 或 ≥300A	≥8kA 或 ≥800A	城市	A	>40
	楼内用户线设备间距 >50m	两端安装						
	楼内用户线 >30m	一端安装				郊区或山区	A	>40
	楼外用户线设备间距 >30m	两端安装						
信号线	用户话路信号线	一端安装	GDT+PTC ABD+PTC	≥3kA 300A	≥8kA ≥800A		ABC ABC	>40 <40
	PCM 传输信号线 >30m	两端安装	GDT+PTC	≥3kA	≥8kA	郊区或山区	ABC	
	网管监控线 >30m	两端安装						
同轴天馈线		终端处		≥5kA	≥10kA	郊区或山区	ABC	>25

注 1. PTC 为正温度系数热敏电阻器。
2. 雷暴日<40 天, 但局站数据信号设备有雷击事故发生, 应安装 SPD。
3. 一端(两端)安装的“端”是指主设备端。
4. 局站 A——综合通信大楼、交换局、模块局、卫星地球站、数据中心; 局站 B——微波站; 局站 C——移动通信基站、接入网站。

- (1) 系统的工作电压和电流是多少? 以此确定 SPD 的 U_c 和额定电流。现在信号用 SPD 的 U_c 有两种表示方法, 一种是指线地电压, 一种是指线间电压, 应注意区分。
- (2) 传输的是什么信号? 确定 SPD 的截止频率和要进行的传输试验。
- (3) 与 SPD 连接的输入端阻抗特性是怎样的? 确定 SPD 输出端是否要有去耦阻抗。
- (4) 与 SPD 连接的输入端的冲击抗扰度 (如何通过了哪一级冲击抗扰度试验) 如何? 确定 SPD 的能量配合特性。
- (5) 安装要求。确定 SPD 的结构形式, 是模块式, 还是其他形式。
- (6) 与电源用 SPD 一样, 对于选用的正确性, 一定要

通过试验来验证。

电源用 SPD 的安装要求, 对信号用 SPD 也是适用的。应当说, 信号用 SPD 的安装要求比电源用 SPD 的安装要求更严格, 特别是工作在高频条件下的 SPD, 应遵守高频设备的工艺技术要求。用于测量电路的 SPD 尤其要注意保证线路的平衡, 避免共模电压引起的差模输出, 引入附加误差。

4.5 信号用 SPD 的典型产品

4.5.1 天线馈线用 SPD

天线馈线用 SPD 见表 2. 14-26。

4.5.2 数据线用 SPD

DLP 型数据线用 SPD 见表 2. 14-27。

表 2. 14-26 天线馈线用 SPD(中光高科产业发展集团)

型 号	技术特征	频率范围	相对带宽	最大放电电流	限制电压
ZWWT	波导分流型	3~2500MHz	最大 182%	≥10kA, 8/20	≤40V
ZGTT	λ/4 短路线	130~3600MHz	最大 182%	≥60kA, 8/20	≤100V
ZGKT	气体放电管	DC~AC3000MHz		≥10kA, 8/20	

表 2. 14-27 DLP 型数据线用 SPD(北京爱劳科技有限公司)

型 号	最大持续工作电压 U_c (V)	最大钳位电压 (V)	传输频率/速率	接口类型
DLP-I	5,15,30	50,50,50	30Mbit/s	DE9
DLP-II	5,15,30,50,100,150,200	10,30,60,75,150,225,300	40Mbit/s	
DLP-III	5	20	100Mbit/s(40MHz)	RJ45-12 路,RJ45-16 路(BNC-10 路)
DLP-IV (RJ11)	5,15,30,50,100,150	10,30,60,75,150,225	30MHz	RJ11
DLP-IV (BNC)	5,15,30	10,30,60	≤40MHz	BNC
DLP-IV (L9)	5,15,30,50,100,150	10,30,60,75,150,225	40Mbit/s	L9

注 1. 采用“π”电路三级保护。
2. 通流容量 5kA, 动作电压 $U_0 \geq 1.2U_c$, 插入损耗 ≤0.5dB。

5 SPD 的检测

本节首先列表综述了 GB 18802.1—2002 规定的电源用 SPD 的检测项目、GB 18802.21—2004 规定的信号用 SPD 的检测项目、SPD 专用检测试验设备配置，然后重点叙述了 SPD 的主要测试项目——限制电压测量和动作负载试验

的方法，最后简述几种测试设备。

5.1 标准规定的 SPD 的检测试验项目

电源用 SPD 的检测项目见表 2.14-28，信号用 SPD 的检测项目见表 2.14-29。

表 2.14-28 GB 18802.1—2002 规定的电源用 SPD 的检测项目

序号	试验项目		试验级别	试验方法或主要试验设备
1	标识和标志		I, II, III	目测, 化学试剂擦拭
2	接线端子和连接		I, II, III	专用螺钉起子或扳手、拉力试验机
3	防直接接触试验		I, II, III	标准试指、12V/25A 交流电源测接零电阻
4	待机功耗和残流		I, II, III	交流电压源、功耗表、电流表
5	限制电压		I, II, III	8/20 限制电压仪、组合波限制电压仪
6	确定续流大小的预备性试验		I, II, III	交流电压源; 短路电流>1.5kA, 电压 U_c I, II, III 冲击发生器, 移相触发器, 示波器
7	预处理试验		I, II	8/20 电流发生器, 交流电压源 (U_c , 5A) 移相触发器, 示波器
8	动作负载试验		I, II, III	功耗仪或阻性电流仪, 交流电压源 (U_c , 5A) I, II, III 冲击发生器, 90°相位触发器
9	多极 SPD 总放电电流试验		I, II	功耗仪或阻性电流仪, 8/20 限制电压仪 I, II 冲击发生器
10	二端口 SPD 的附 加试验	电压降百分数	I, II, III	交流电压源, 电阻负载, RMS 电压表
11		额定负载电流		电压源, 电阻负载, RMS 电压表, 温度表
12		负载侧短路试验		短路电流试验设备
13		负载侧电涌耐受性		8/20 冲击电流试验设备、复合波试验设备
14	脱离器 的试验	动作负载试验	I, II, III	(与 SPD 动作负载试验同时进行)
15		耐热试验		恒温加热箱 (80℃, 24h)
16		热稳定性		交流电压源、可调电阻负载, 温度表
17		短路电流耐受性		短路电流试验设备 (U_c , $I_{sc}=1.5\sim50kA$)
18	TOV 故障模 式试验/耐 受模式试验	高压侧故障 TOV 试验	I, II, III	交流电压源 (U_{cs} , 1200V, 200ms, $I_{sc}=300A$)
19		低压侧故障 TOV 试验		交流电压源, 5s, U_{cs}
20	其他试验	软电缆试验		弯曲试验机
21		机械强度试验		撞击试验机、滚筒式试验机
22		外壳耐热试验		恒温加热箱、球压试验装置
23		外壳阻燃试验		灼热丝试验专用设备
24		电气间隙		长度测量仪
25		耐漏电起痕		耐漏电起痕试验仪
26		绝缘电阻		潮湿试验箱、绝缘电阻仪
27		介电试验		交流耐压试验装置 1~6kV
28		环境试验		防尘试验设备、防水试验设备、标准试指

表 2.14-29 GB 18802.21—2004 规定的信号用 SPD 的检测项目

序号	试 验 项 目		试验方法或主要试验设备
1	标识和标志		目测，化学试剂擦拭
2	电压限制特性	以 U_c 测量绝缘电阻	交流电压源（带电流/电阻示值）
3		冲击限制电压	组合波限制电压仪
4		开关型 SPD 的冲击复位时间	多波形冲击发生器，直流电压源（12~135V），示波器
5		交流耐受试验	定时重复通断交流电源（0.1~20A）
6		冲击耐受试验	定时重复触发放电的多波形冲击发生器
7		冲击电流过载故障模式验 交流电流过载故障模式验	8/20 冲击电流发生器 定时重复通断交流电源（0.1~20A）
8		多级 SPD 的盲点试验	多波形冲击发生器，示波器
9	电流限制特性	额定电流试验	多端输出，定时通断交流电源，电阻负载箱，温度仪，计时器
10		串联电阻	
11		电流响应时间	
12		电流恢复时间	
13		最大中断电压	
14		动作负载试验	
15		交流耐受试验	
16		冲击耐受试验	10/1000，10/700，1.2/50-8/20 冲击发生器
17	传输特性测试	电容量	频率 1MHz 电熔测试仪
18		插入损耗	网络分析仪，平衡—不平衡适配器
19		回波损耗	网络分析仪，平衡—不平衡适配器，反射电桥，匹配阻抗
20		纵向平衡试验	正弦信号发生器，电压表（200Hz~200kHz），匹配阻抗直流偏压源
21		误码率（BER）	误码率（BER）测试仪
22		近端串扰（NEXT）	网络分析仪，平衡—不平衡适配器，匹配阻抗
23	机械性能试验	接线端子和连接器的试验	专用螺钉起子或扳手、拉力试验机
24		机械强度（安装）	人工检验
25		外壳防护等级检验	防尘试验设备、防水试验设备，标准试指
26		防直接接触试验	标准试指、12V/25A 交流电源测接零电阻
27		外壳阻燃试验	灼热丝试验专用设备
28	环境试验	高温和高湿度的试验	湿热试验设备
29		冲击浪涌下的环境循环试验	湿热箱、冲击发生器、交流电压源、无感电阻
30		交流浪涌下的环境循环试验	湿热箱、交流电压源、无感电阻

5.2 SPD 专用检测试验设备配置

SPD 专用检测试验设备配置，见表 2.14-30。

表 2.14-30 SPD 专用检测试验设备配置

序号	名 称	参 考 型 号	主 要 性 能	主 要 用 途
1	便携式 SPD 测试仪	SPD888	1mA 恒流源和 100V/s 斜升电压；50~1300V； 恒压源：50~1000V/0~200μA	SPD 及其元件现场检测
2	压敏电阻测试仪	CJ1001	测量 75% U_c 电压下的漏电流和 α ，电压范围 0~ 1400V 和 0~3000V 两种	SPD 和钳位元件的生产和检验测试
3	斜升电压测试仪	CJ1505	斜 升 电 压：100V/s，1kV/s，10kV/s，100kV/s 100V/μs，1kV/μs；输出电压：50V~5kV；冲击次数 1~999 次；冲击间隔 10~300s	SPD 和开关元件的生产和检验测试

续表

序号	名称	参考型号	主要性能	主要用途
4	功耗仪	PR-1	50Hz 电压 0~1000V, 功耗量程 20/200mW, 同时测量全电流、容性电流、阻性电流峰值	SPD 及其元件的生产和检验测试
5	老化试验和筛选机	MPR-1	恒温箱 (室温-200℃), 测控系统, PR-1 功耗仪	SPD 和 MOV 的电压/温度老化筛选
6	冲击四参数测试仪	4P-1	冲击试验时测量进入试样的能量、电荷量、电流峰值和电压峰值四个参数	与冲击电流/电压发生器配合使用
7	动作负载试验电源	TS-1	50Hz 正弦电压 0~600V, 短路电流 200A, 同步相角 (0°~360°) ±5°, 耦合/去耦网络	与冲击电流/电压发生器配合使用
8	高能冲击电流发生器	T1T2-150	8/20 电流 150kA, I 级试验电流 75kA (GDT), I 级试验电流 20kA (MOV), 充电电压 45kV, 气缸操作波形转换	SPD 及其元件的通流能力测试, I 级、II 级试验
9	8/20, 组合波发生器	T2T3-20	8/20- (0.1~10) kA, 组合波 20kV/10kA, 重复冲击 1~999 次, 间隔时间 10~300s	限制电压测试, 重复冲击试验
10	冲击老化和筛选机	MS-1	冲击电流 100A~10kA, 参考电压测量比较仪, 机械传动系统	SPD 和 MOV 生产中的冲击老化筛选
11	工频短路试验机	SC-1K	工频试验电源, 第一个半周期峰值 1000A, 磁位计, 示波器	TOV 试验, 续流试验, 短路试验
12	宽波指数电流发生器	BD-1	B1 波 (10/1000) 150A, B2 波 (10/700) 5kV, D1 波 (10/350) 3kA, D2 波 (10/250) 3kA, 1~999 次, 间隔 10~300s	信号 SPD 试验
13	A 型交流试验电源	SC-600	50Hz 正弦电压 0~600V, 10A, 短路电流 200A, 电阻负载箱, 温度仪, 功耗仪	热稳定性试验, 伏秒特性测试
14	B 型交流试验电源	SC-200	50Hz 正弦电压 0~200V, 30A, 连续输出或定时间长度输出, 电阻负载箱, 温度仪	信号 SPD 电流限制特性的七项试验

5.3 限制电压测量和动作负载试验

限制电压测量和电源用 SPD 的动作负载试验, 或信号用 SPD 的冲击耐受试验, 是 SPD 最重要的, 也是在研究、生产和验收中最经常进行的两项检测项目, 试验技术也有其特殊性。

5.3.1 限制电压测量

5.3.1.1 限制电压测量系统

限制电压是 SPD 在规定的条件下, 施加规定波形和幅度的冲击时, 在其接线端子间测得的最大电压峰值。图 2.14-38 所示是一个基本的限制电压测量系统。由冲击发生器输出的冲击加到 SPD 的两个接线端子 JX1 和 JX2 上, 冲击电流用磁位计 (罗可夫斯基线圈) CW 来测量 (也可用分流器来测量), 被测 SPD 的残压用分压器 FY 来测量, 磁位计和分压器的输出用示波器显示, 示波器既可以测量峰值, 也可以测量波形。为了安全和防止干扰, 示波器用隔离变压器 T 来供电。冲击发生器的波形形成网络 PG 通过一个高电

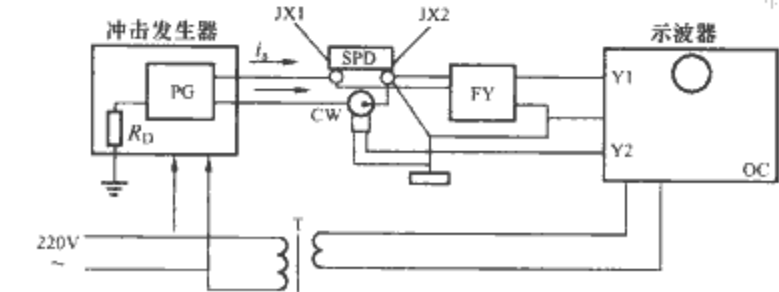


图 2.14-38 基本的限制电压测量系统

阻 R_D (R_D 用来泄放感应电荷) 接地, 因此对于冲击波来说, PG 是浮地的, 整个冲击系统只有 JX2 一点接地, 这对保证正确测量十分重要。但在有的测试场合, 要求整个冲击系统浮地, 那就要采用图 2.14-39 所示的差分测量。差分测量时, 被测电压的两端 JX1 和 JX2 各通过一只分压器 FY1 和 FY2 接地, 两分压器的输出送给示波器进行差分测量。

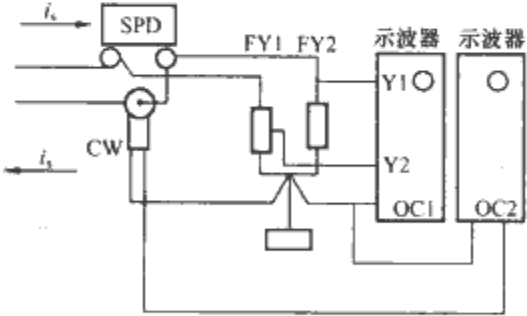


图 2.14-39 限制电压的差分测量

5.3.1.2 有关限制电压测量的具体规定

SPD 的限制电压测量所依据的技术标准主要有三个: GB 18802.1—2002、GB 18802.21—2004 和 UL 1449, 三个标准的规定并不完全相同, 测试时要特别注意。

(1) 冲击的施加点和电压峰值的测量点。GB 18802.1—2002 规定, 带连接导线的一端口 SPD, 和 UL 1449 的固定连接式一端口 SPD, 应带 15cm 长的导线 L, 在导线末端加冲击和测量电压峰值, 如图 2.14-40 所示, 这是为了模拟实际使用状态。电源端子与负载端子分开的一端口

SPD 和二端口 SPD, 冲击应施加在电源侧端子上, 而在负载侧端子上测量电压峰值。其他情况则直接在 SPD 的接线端子上施加冲击和测量电压峰值。

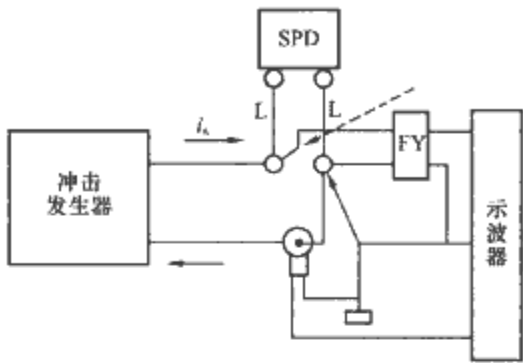


图 2.14-40 带规定接线 L 的测试

(2) 限制电压测试所用的冲击波形。依据 GB 18802.1—2002 的规定, 对于电源用 SPD, 不含开关特性元件的 I、II 级试验 SPD 采用 8/20 电流波; 含有开关特性元件的 I、II 级试验 SPD, 要分别用 1.2/50 电压波和 8/20 电流波各进行一次测量; III 级试验 SPD 采用组合波测量。

依据 GB 18802.21—2004 的规定, 信号用 SPD 采用组合波测量; 含有 GDT 的 SPD, 还要用 1kV/μs (短路电流为 10/1000) 的电压波进行测试。

UL 1449 规定所有类型的 SPD 都用组合波。

(3) 加和不加最大持续工作电压 U_c 的限制电压测试。GB 18802.1—2002 规定, 在测试限制电压时, I、II 级试验的一端口 SPD 不加最大持续工作电压; I、II 级试验的二端口 SPD 和 III 级试验 SPD, 要加 SPD 的最大持续工作电压 U_c 。

GB 18802.21—2004 规定, 信号用 SPD 的限制电压测试, 一律不加最大持续工作电压 U_c 。

UL 1449 规定, 所有 SPD 在测试限制电压时要加最大持续工作电压 U_c 。

凡是加最大持续工作电压 U_c 时, 将冲击叠加在工频电压的峰点, 且冲击的极性应与工频电压相同。

对于电源的容量, GB 18802.1—2002 规定在 U_c 电压下额定电流不小于 5A; UL 1449 要求交流电源的短路电流, 当 SPD 无续流时为 200A, 功率因数为 0.8~1.0, 当 SPD 有续流时按 SPD 接入的电源系统来选取。

(4) 限制电压的计算方法。对每只 SPD, 都进行正/反两个方向的测试, 取两者中的大值作为该只 SPD 的限制电压值, 同时以所有测试结果中的最大值作为样品所代表产品的限制电压。

但 UL 1449 有不同的规定, 它规定以 3 只样品各 3 次测试所得的 9 个限制电压的平均值, 作为样品所代表产品的限制电压值, 它不应大于规定的限制电压额定值 (SVR), 同时所有测得的限制电压中不允许有一个超过规定 SVR 的 110%。

只有电压钳位元件的 SPD, 它的限制电压值随着测试电流幅值的增大而单调增大, 所以只要测试 I_n 或 U_{oc} 这一点即可。但是, 当多级 SPD 中有盲点, 或在测试中可能发生振荡时, 最大电压峰值就不一定出现在测试电流幅度最大的时候, 为了找到这个最大电压峰值, 需要测量 (0.1, 0.2, 0.5, 1.0) I_n 和 I_{peak} 或 I_{max} 五个点, 再把测得的电压峰值 (绝对值) 与测试电流幅值绘成关系曲线图, 画出与测试数据点最吻合的拟合曲线, 以曲线上在 I_{max} 或 I_{peak} 范围内的最大电压峰值作为样品所代表产品的限制电压。

(5) 每次施加冲击前, 试样温度都应处在室温, 故多次冲击的间隔时间应足以使试品冷却。

上述各项规定汇总见表 2.14-31。

表 2.14-31 SPD 限制电压测量的有关规定要求

技术标准	SPD 种类	冲击波形	冲击波的幅值	冲击次数
GB 18802.1—2002	I 级和 II 级试验 只有电压限压元件	8/20 电流波	标称放电电流 I_n	正反各 1 次
GB 18802.1—2002	I 级和 II 级试验 有电压开关元件	1) 8/20 电流波 2) 1.2/50 电压波	(0.1, 0.2, 0.5, 1.0) I_n 和 1 次 I_{peak} 或 I_{max} ; 6kV、10kV	正反各 1 个序列 正反各 5 次
GB 18802.1—2002	III 级试验 只有电压限制元件	1.2/50-8/20 组合波, 2Ω	规定的 U_{oc}	正反各 1 次
GB 18802.1—2002	III 级试验 有电压开关元件	1.2/50-8/20 组合波, 2Ω	规定 U_{oc} 值的 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 倍	4 种开路电压, 每种正反各 2 次
GB 18802.21—2004	通信和信号网络 用 SPD	C1 波—— U_{oc} 1.2/50, 0.5kV、1.0kV 中的一种 C2 波—— U_{oc} 1.2/50, 2kV、4kV、10kV 中的一种 (C1、C2 波的 I_{oc} 为 8/20, 输出阻抗 2Ω) C3 波—— U_{oc} 1kV/μs, ≥1kV/μs, 10/1000, 10A、25A、100A 中的一种		正反各 5 次
UL 1449	各种类型	施加 U_c , 每个模式施加 3 次 1.2/50-8/20 组合波 6kV/3kA, 同步相角 90°		3 只样品各 3 次

注 对于包含开关元件的 SPD 的试验, 发生器的输出电压的上升速率宜限制在 10kV/μs 内。

5.3.1.3 限制电压测量中保证精度的注意事项

SPD 的限制电压测量, 必须遵守大电流、高频率、高

电压测量的基本规则, 否则很容易引入大的误差。为保证测量精度, 要特别注意防止放电电流对测试系统的干扰, 正确

接线和选择接地点，以及试样与冲击源的阻抗匹配等几个问题。

(1) 防止放电电流对测试系统的干扰。实践表明，在 SPD 的限制电压测试中，避免放电电流对测试系统的干扰，特别是对分压器的干扰，是非常重要的。判别这种干扰是否严重的一个简单方法，是用一只合格的压敏电阻器代替试品，以要求的放电电流对它放电，用示波器测量压敏电阻器两引线紧挨电阻体部位的限电压波形，限电压波的峰点应与放电电流的峰点在时间上基本重合。如果限电压波的峰点明显先于电流的峰点，则说明存在这种干扰，一般情况下可通过调整分压器的空间位置和方向来消除放电电流的干扰。为了说明这一点，我们来看图 2.14-41 所示的波形。

图 2.14-41 所示是以 8/20 电流测试 MOV 限制电压的波形情况。①是放电电流的波形，⑤是与放电电流①有磁耦合的电路中所产生的感应电压（干扰电压）。若耦合系数为 M ，则这个电压为 $U_i = M di/dt$ ，这个干扰电压的特点是在 8/20 电流的起始时刻最大，因为这时 di/dt 最大，而在 8/20 电流的峰点 t_m 时刻， $U_i = 0$ 。干扰电压⑤叠加在 MOV 的正常限电压②和③上，就得到了受干扰的限电压④，它的峰点时间明显前移。如果测试系统与放电电流之间不存在磁耦合，就没有 U_i ，测得的限电压应是②或③，③对应的放电电流比②大，因此限电压也高，但两者的峰点位置基本重合。

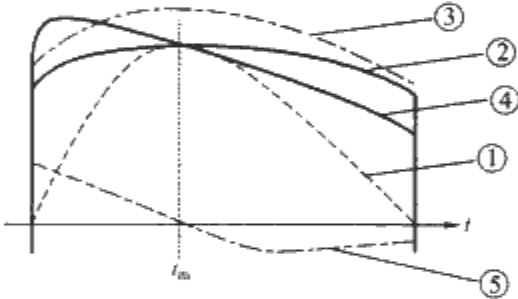


图 2.14-41 以 8/20 电流测试 MOV 限制电压的波形
①—8/20 电流波；②—8/20 电流小时的限制电压；③—8/20 电流较大时的限制电压；④—叠加有干扰的限制电压；
⑤—8/20 电流波产生的干扰电压分量

(2) 正确接线和选择接地点。必须用 4 线法（凯文接线）连接试样，将给试样输送电流的两个连接点 I_1 、 I_2 ，与测量电压的两个连接点 U_1 、 U_2 分开，如图 2.14-42 所示。 U_1 、 U_2 是规定的限制电压测量点， I_1 、 I_2 应在 U_1 、 U_2 的外侧，这样做的目的是排除接线阻抗和接点 I_1 、 I_2 阻抗的影响。4 个连接点必须清洁，连接必须可靠。将 U_1 、 U_2 电压引出的线要用双芯屏蔽线，尽量减小连接线形成的回路面积，因为冲击电流产生的磁通穿过它会引起附加电压。冲击源和测试系统只能单点接地，一般将 U_1 、 U_2 中的低电位点接地。

积，因为冲击电流产生的磁通穿过它会引起附加电压。冲击源和测试系统只能单点接地，一般将 U_1 、 U_2 中的低电位点接地。

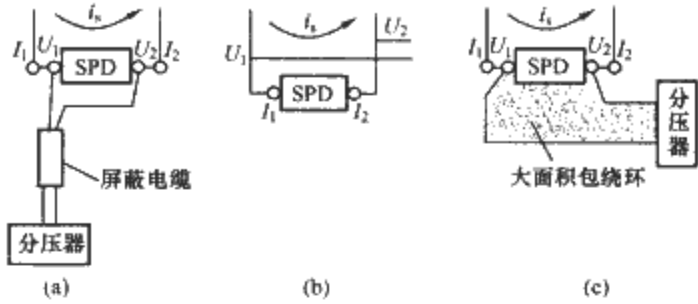


图 2.14-42 限制电压测量时试样的连接
(a) 正确；(b) 不正确；(c) 不正确

(3) 试样与冲击源的阻抗匹配。每一台冲击发生器都有其特性阻抗，只有在这个阻抗与试样阻抗保持某个比例时波形才正确，这就是冲击试验中的阻抗匹配问题。限制电压测量中如发生波形异常，要注意检查这种匹配关系是否在冲击发生器规定的范围内。

5.3.2 动作负载试验

5.3.2.1 动作负载试验系统

图 2.14-43 所示是一个可进行动作负载试验的完整系统，它可以在试样 DUT 上施加交流偏置电压，且可使冲击放电与交流偏压保持同步，如果不需要这个功能，只要单纯进行冲击测试，则虚线框内的部分可省去。

该系统的工作过程为：

起动指令通过充电开关 2 将 S1 闭合，充电电源 1 通过隔离电阻 R 对储能电容 C。充电，当电压检测电路检测到的充电电压与设定电压相等时，给放电开关 4 发送允许放电指令，当同步电路 13 的同步指令到来时，放电开关 4 将充电开关关断，同时将放电开关 S2 接通，C。对波形形成网络 5→耦合元件 6→试样 DUT→分流器 FL 放电，形成所要求的冲击波。偏置电源 10 通过去耦网络 9 将交流偏压加在试样 DUT 上，偏压源的电压用真有效值交流电压表 11 测量。偏压源推动的流过 DUT 的电流由真有效值电流表 12 测量。耦合元件 6 防止偏压进入波形网络，去耦网络 9 防止冲击电压进入偏压源。流过 DUT 的冲击电流由分流器 FL 和 I_p 电路 8（或示波器）检测。DUT 两端的电压由分压器 FY 和 U_p 电路 7（或示波器）检测。

5.3.2.2 动作负载试验的顺序和方法

动作负载试验按表 2.14-32 所示的顺序和方法进行。这个试验是为了模拟 SPD 在实际工作中同时经受最大持续工作电压 U_c 和浪涌电流作用的情况，设计试验时考虑了以下一些问题：

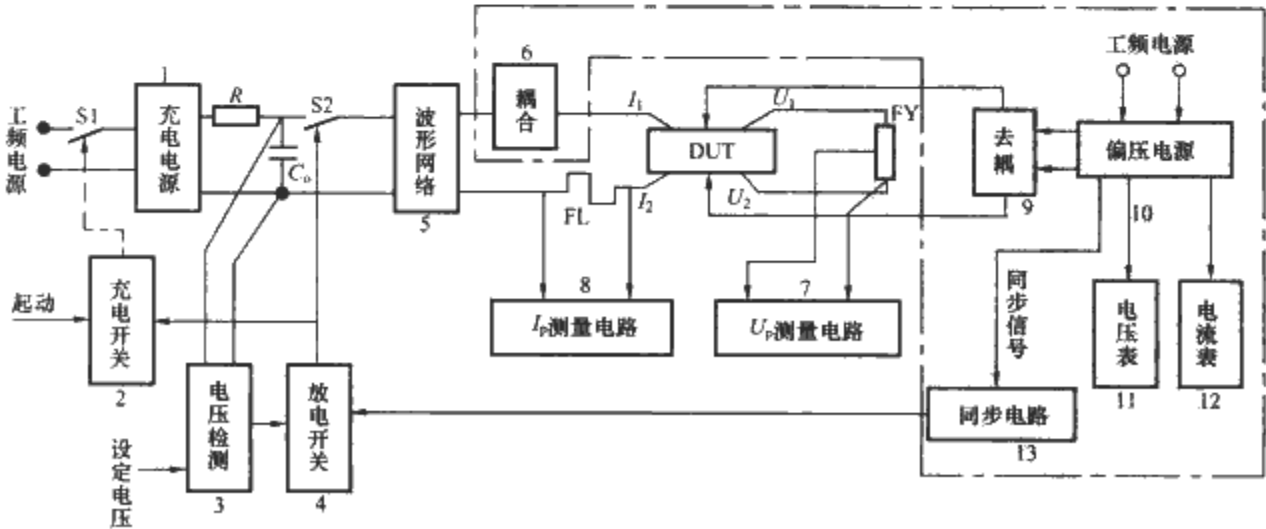


图 2.14-43 动作负载试验系统

表 2. 14-32 SPD 动作负载试验的顺序和方法

标 准	IEC 61643-1/GB 18802.1—2002			UL 1449	
SPD 类别	I 级试验	II 级试验	III 级试验	类型 1、2 和其中的类型 4	类型 3 和其中的类型 4
样品数	3 只	3 只	3 只	3 只	3 只
对交流电源的要求	1) SPD 的续流≤500A 时, 电源容量应保证有续流时 SPD 上交流电压峰值的下降≤10% 2) SPD 的续流>500A 时, 电源预期短路电流应等于 SPD 的额定断开续流或 500A, 两者取大值 3) N-PE 间的 SPD, 电源预期短路电流≥100A			1) 无续流的 SPD, 电源的短路电流≥200A, 功率因数符合规定; 或电源的阻抗应使得在有电流时, SPD 端子上工频电压峰值≥0.9 (MCOV 的峰值) 2) 有续流的 SPD, 电源的可获得短路电流和功率因数, 应符合规定	
试验前测量	1) 以 I_n (I、II 类) 或 U_{oc} (III 类) 测量限制电压 2) 测量功耗或阻性电流峰值			6kV/3kA 组合波叠加在 U_c 交流电压的 90°相角上测量限制电压	
预处理冲击和动作负载试验	1) 15 次预处理冲击 冲击波: I 类, 8/20, 电流峰值 I_n 或 I_{peak} 中的大者; II 类, 8/20, I_n ; III 类, 组合波 U_{oc} 冲击叠加在 U_c 上, 单向冲击 15 次, 同步相角从 0°开始, 以步距 30°±5°递增, 15 次冲击分三组, 同组的间隔时间为 50~60s, 组间为 25~30min。两组之间, 试品无需施加电压 2) 动作负载试验 冲击波: I 类, I_{imp} ; II 类, 8/20, I_{max} ; III 类, 组合波 U_{oc} 冲击叠加在 U_c 同极性峰点上, 电源容量≥5A。以规定冲击的 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 倍各冲击一次 (I 类和 II 级试验), 或正/反向各冲击一次 (III 级试验)。再在 U_c 下, 以 I_n (I、II 类) 或 U_{oc} (III 类) 冲击一次, 检查热稳定			1) 类型 1, 类型 2 和用于其中的类型 4 冲击波: 8/20, I_n 。冲击叠加在 U_c 上, 单向冲击 15 次, 同步相角从 0°开始, 以步距 30°±5°递增, 15 次冲击分三组, 同组的间隔时间为 50~60s, 组间为 25~30min 对于 $I_n=20kA$ 的 SPD, 先以 10kA 在加 U_c 下冲击 10 次, 再在无 U_c 下以 20kA 冲击 5 次, 然后立即加上 U_c 保持 30min 2) 类型 3 和用于其中的类型 4 组合波 6kV/3kA 叠加在 U_c 上, 冲击 15 次, 同步相角从 0°开始, 以步距角 30°±5°递增, 15 次冲击分三组, 同组的间隔时间为 50~60s, 组间为 25~30min	
试验后的测量	1) 以 I_n (I、II 类) 或 U_{oc} (III 类) 测量限制电压 2) 测量功耗或阻性电流峰值			6kV/3kA 组合波叠加在 U_c 交流电压的 90°相角上测量限制电压	
判据	1) 没有击穿或闪络的迹象 2) 每次冲击后能保持热稳定 3) 冲击后限制电压不大于 U_p 4) 冲击后功耗增量≤20%, 或阻性电流峰值≤1mA			试验后的限制电压, 相对于试验前测量值的偏差≤10%	

(1) SPD 实际工作时, 浪涌电流是随机地叠加在系统电压上的。当系统电压是工频交流时就有浪涌电流与系统电压的相位关系问题, 一般来说, 当 SPD 是电压钳位特性时, 浪涌电流叠加在系统电压的同相位峰点是最严酷的情况。对于开关特性来说, 由于开关元件通常有续流, 不同的叠加相位, 续流是不一样的, 因此在本试验中设计了相位逐级改变的试验。

(2) 试验时工频交流电源的容量, 即输出能力, 决定了 SPD 导通时涌入 SPD 的电流, 对试验结果有重要影响, 应予以规定。

(3) SPD 经浪涌作用后会产生性能劣化, 为此, 试验中安排了 15 次冲击的预处理试验, 要求 SPD 经受预处理冲击后还能承受极限冲击应力的作用。

(4) 预处理冲击后再以极限冲击的 0.1, 0.25, 0.50, 0.75 倍和 1.0 倍进行冲击, 是为了检查 SPD 盲点的影响 (如果有盲点的话)。

(5) 判断动作负载试验是否合格的判据, 主要有三个方面:

- 1) 试验中不会出现击穿、闪络和破坏现象。
- 2) 每次冲击后 SPD 能保持热稳定, 即每次冲击后给试样加规定的工频电压, 保持 30min, 在最后 15min 内, 试样电流的阻性分量或功耗能稳定地降低。
- 3) 动作负载试验后试样的性能变化在允许范围内。

5.3.2.3 限制电压测量和动作负载试验中的安全性

限制电压测量和动作负载试验是高电压、大电流、高能量试验, 必须注意安全, 遵守高压试验的安全规则和设备制造商规定的各项安全要求。

6 低压电涌保护器的发展

随着电子技术的发展, 防雷技术及防雷产品越来越受到各国的重视, 各大公司都推出了完整的低压电涌保护器 (SPD) 系列产品, 如 PHOENIX、OBO、DEHN、ABB、SIEMENS 等, 近些年 SPD 技术与产品均发展迅速。

6.1 低压电涌保护器产品 (SPD)

用于配电系统保护的 SPD 已形成 I、II 和 III 级完整的系列, I 级 SPD 的冲击放电试验电流 I_{imp} 可达到 100kA (10/350μs), 其中 OBO 公司的 MCD125-B/NPE 型 SPD 的 I_{imp} 可达到 125kA (10/350μs)。I 级 SPD 普遍采用了插入式的模块化结构, 并且基座采用整体式结构, 模块更换方便, 机械结构可靠性高。

除了分级产品外, 为了方便用户使用, 很多公司推出了 I+II 级组合式结构的 SPD, 可直接用于 LPZ0 至 LPZ2 区的保护, 简化了安装和接线, 可降低成本; 且响应速度快, 可直接用于保护用电设备。例如, 图 2.14-44 所示是 PHOENIX 公司开发的 FLASHTRABFL-T-CP-3S-350 型 I+II 级组合式 SPD, 采用整体式基座, 插入式结构, $U_c=350V$, 最大放放电电流 $I_{imp}=100kA$ (10/350μs), $U_p\leq 1.5kV$, 响应时间 $t_a\leq 25ns$ 。

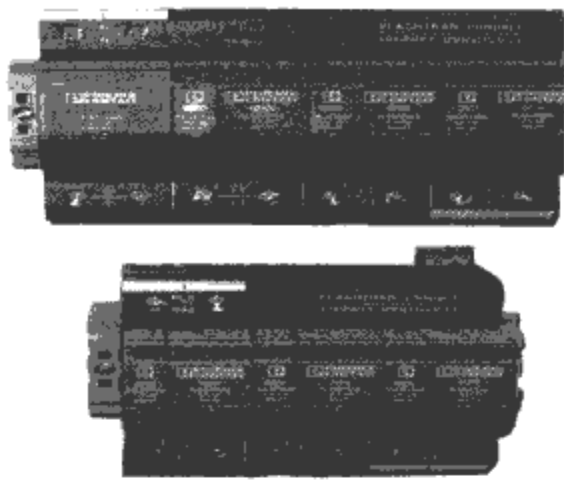


图 2.14-44 PLT-CP-3S-350 I + II 级 SPD

SPD 一般均有劣化指示, 但劣化指示只有在 SPD 故障时才能发出指示。为了能预先知道 SPD 的状态, 并在 SPD 故障前就能更换 SPD, 避免系统的故障运行, 开发出了能显示寿命的 SPD。例如, DEHN 公司新开发了 TH275L1 预作用热控制的 SPD, 用户能观察到 SPD 的状态, 并在 SPD 损坏前及时更换。SPD 有绿—黄—红三色指示器, 并具有浮动的转换触头可发出遥控信号, 指示 SPD 的工作状态。正常时指示器显示绿色; 如果由于热负载使压敏电阻的结构有不可逆转的损坏危险时, 指示黄色并驱动遥控信号触头, 建议用户在装置失去保护前更换 SPD 模块; SPD 故障时则显示红色。

用于信号系统的直流过电压保护器有了较大的发展, 例如 ISKRA 公司的产品中有一类针对数据传输系统的过电压保护器 (型号为 IM 和 VM), 它是针对末级的直流过电压保护器, 品种很多, 有固定模块式的, 也有插入式的, 还有其他的一些过电压保护元件, 例如: 用在印刷线路板上的 IM-NF、用于计算机网络的 ZV-BNC、保护局域网设施的 LZ 24NET19 以及保护插座的 ZE200NET 等。ABB 公司也有类似用途的直流过电压保护器, 如 OVR TC, 用于保护电话和数据传输线。

专门用于总线系统的 SPD 也有了新的发展, 例如 DEHN 公司开发的用于 AS-I 总线的 AS-IBAS 电涌保护器, 设计结构类似于 AS-I 耦合模块, 特别适合于系统更新用, 可以用 SPD 模块更换耦合模块。AS-IBAS 电涌保护器响应速度快, 能显著地抑制电涌对总线的影响, 不仅能抑制雷电干扰, 也能抑制静电放电和开闭操作过电压干扰的影响。电涌电流通过安装轨或插入式的接地连接泄放至大地。

6.2 雷电防护系统技术

雷电防护技术牵涉到许多方面, 从近些年国际研究的最新发展来看, 雷电防护注重系统解决方案, 其中级间匹配技术和后备保护技术是研究的重点, 也是建立完整雷电防护系统的基础。

6.2.1 级间匹配技术

在一个系统中, 由于众多设备冲击耐受特性的差异、安装位置的分散以及电涌保护器的标称放电电流的限制, 一只电涌保护器不能解决问题。又由于各电涌保护器动作特性和响应时间的不同, 在电涌侵入时各级电涌保护器不一定按预期的要求动作, 则可能达不到预定的保护效果, 严重的会出现爆炸、起火等事故。因此, 级间配合是系统防雷中重要的、固有的问题。级间匹配包括了三种配合技术: ①前级、后级均为 MOV 型电涌保护器; ②前级、后级均为间隙型电涌保护器 (或气体放电管); ③前级为间隙型电涌保护器 (或气体放电管)、后级为 MOV 型电涌保护器。针对这三种配合技术, 一般采取四种能有效实现级间配合的措施: 改变 SPD 的特性参数, 增加线路长度, 串入解耦器, 采用降低放电电压的触发型间隙。前期研究表明, 可以通过三种级间配合验证方法对级间匹配进行验证: 解析法、计算机仿真法、雷电模拟试验法。

6.2.2 后备保护技术

SPD 的后备过电流保护是位于 SPD 外部的前端, 作为电气装置一部分的过电流装置 (如熔断器或断路器), 其作用是当 SPD 不能切断工频短路电流时, 可避免 SPD 过热和损坏。因此后备过电流保护元件的正确选择是确保 SPD 正常、可靠运行的保证。

后备过电流保护元件与 SPD 的配合及后备过电流保护元件的选用对限制电压都有影响, 这将直接关系到系统运行的可靠性、安全性; 后备过电流保护元件参数选择无标准可循, 实际工程中选择的科学性、合理性有待研究。目前通过试验现象和试验数据进行分析总结出: 在相同冲击电流情况下, 使用断路器比使用熔断器所产生的残压高 0.1~0.25 倍; 并绘制了 8/20、10/350 两种冲击波形下熔断器或断路器的“额定电流—冲击电流”对应关系图, 为后备保护的选择提供了依据。

雷电防护级间匹配技术和后备保护技术的研究刚刚起步, 这些技术的突破将从根本上解决雷电防护系统技术的难点, 使系统防护更趋完善, 是今后一个时期发展的热点。

第15章 基于现场总线的低压电器和系统

1 低压电器通信原理

1.1 低压电器的通信要求和现场总线

传统的低压电器依靠机械电气原理动作,如依靠电磁力,双金属片受热变形操作,通过电磁阻尼或空气阻尼产生延时,实现一系列控制和保护,它们的功能简单,不存在数据通信的要求。但是,近年来以微处理器为标志的电子数字控制技术逐步进入低压电器领域,使这个传统领域发生深刻的变化。微处理器通过写入程序很容易实现复杂和精确的测量、运算和控制,以前开发的技术很容易继承,迅速提高的存储容量和运算能力,不断下降的成本,以及电子产品大量复制的方便性,赋予电子控制强大的生命力和竞争能力。数字信息技术的介入使低压电器进入智能化时代,通过对数据的处理实现各种功能,每个低压元件通过数据通信与系统紧密连接,它向系统提供采集的现场数据,接收系统的命令使分布的元件能协调工作。

与此同时随着电力使用量的迅速增加,电力供给的安全性日益受到人们的关注,为了保障供电质量和系统的安全,合理地分配电能,对实际配电系统的监视和控制成为普遍采用的措施,为此必须获取配电系统的实时信息,并通过对现场信息的分析作相应的操作。轨道交通配电系统是这种需求的典型例子,因为轨道线是一个整体,机车和各车站的供电是整个线路正常运行的基本条件。但一条线路可能由多个分散的变电站分段供电,流动的机车也可能造成负荷的变动,任何分段的故障都可影响整个线路,因此控制中心必须掌握各变电站的实时运行参数,监控各变电站和调度机车的运行。

传统的获取现场数据的方法是为需要监视的回路配置专门的检测模块和控制模块,测量回路的电压、电流、功率、开关的ON/OFF状态,传送到监控中心,监控中心的命令传送到现场控制模块的驱动电路,操作设备动作。这种方法很直观,监控设备与低压电器是分离的,因此要重复配置测量和控制电路,而且要针对实际对象进行设计、安装、调试。自然代价高昂而且不能标准化。

另一种是现在普遍采用的通过现场总线通信的方法。鉴于低压电器的智能化趋势,很多设备已经采用微处理器控制,如带电子脱扣器的断路器、智能电动机保护器、软起动器、变频器、电量监控仪表。这些设备本身都在实时检测相关现场参数进行处理,完成它自己的控制和保护功能,设备内有现成的数据。监控系统没有必要重复检测,而只需要与现场设备接口,通过数据通信就可获得需要的现场数据,再加上监控系统的程序就可以实现检测和协调控制的功能。

实现数据通信可以使用各种规约或自定义的规约,但是现在的系统可能覆盖的范围逐步扩大,不同厂商设备的互联,信息的自由流通成为基本的要求,因此开放的通信规约成为制造商普遍接受的技术潮流。

1.2 低压电器的通信要求

(1) 作为配电系统的控制和保护元件,需要与其他元件

连锁动作、协调保护,运行时要求与其他设备交换电流、电压、功率、功率因数、谐波分量、开关状态、操作命令等控制参数。为了保证系统的实时性能,这些实时参数应当被不断的更新,使它与系统的实际状态保持一致,一般都是通过一定时间间隔的周期传送来保证。一般来说低压元件的数据包比较小。

(2) 作为智能的控制和保护元件,可以通过参数配置将通用的设备设置为适合于特定的应用,这个配置也可通过网络实施,此外故障数据的报告和查询也有相似的要求。

(3) 低压电器是基础元件,它提供的总线接口应使第三方很容易将它接入系统,实现与其他元件的互操作。

(4) 通信接口的配置应直观方便,不需要另外的编程。

(5) 传输效率高,占用资源少。当网络上节点数量增加时,仍能保持快速的响应。

1.3 通信传输的机制——周期报文和非周期报文

上面已经提到低压电器的通信有两种不同的通信要求,周期传送的实时参数通信和时间要求相对不高的非周期的配置,故障报文。实际上这不仅是低压配电系统的要求,也是工业控制应用的网络通信的普遍要求。

周期报文:这种报文是有规律地周期重复传送的,报文内容是预先约定的,不需要在报文中加以说明,一般在运行时也不修改。它的最典型的应用就是远程I/O站与主机的连接。远程I/O通过通信网连接到主机,I/O站通过数据报文(输入数据报文)将它的实时状态报告给主站,同时接受主机的控制命令(输出数据报文),这个通信是周期执行的,使主站能不断得到远程I/O的实际状态,以便通过控制程序及时作出反应。这时周期报文的传送周期成为远程I/O响应速度的决定因素。每次传送占用总线的时间与数据包大小有关,缩短周期可以提高响应速度,但这意味着通信负荷的成倍增加。通常周期报文是工业网络的主要负荷,所以必须仔细考虑报文的内容和传送周期。在低压电器通信中通常将开关的状态,操作命令,控制参数,电路的电流、电压等打包在周期报文内,以得到及时的传送。

非周期报文:这种报文是在需要时传送,内容广泛,在报文内会对要实施的操作和操作对象或内容加以说明。一般用于设备的配置,程序的上载、下载,故障信息的传送或诊断。虽然报文会比较长,但一般发生的概率不大,对网络的负荷影响很小,而且这些信息对传送的时间要求相对较低。

在DeviceNet协议中这种通信称为显式报文通信,DeviceNet定义了各种报文服务(读取属性Get_attribute,设置属性Set_attribute,打开连接Open Explicit Message Connection等),用功能代码表示各种服务,另一项工作是通过对象模型表示设备在网络上的特性,将设备要在网络上交换的数据定义为对象的属性,这样通过对象—实例—属性的编号就可寻址到所请求的数据。在一个显式报文内包含了访问的节点(地址)、对象(对象—实例—属性编号)、要做的事(服务代码,如读取属性是“OE”),然后通过对应的应答报文报告所指定的服务。

由于显式报文只有在发生时才会产生通信负载，定义的对象和属性的数目与通信负荷并无直接关系，所以很适合配置、查询、故障报告等各种复杂但偶发的通信。

以上周期、非周期两类通信机制实际上都是同时需要的，但是以前的通信协议大多不能同时支持这两种通信机制，这就造成网络资源的浪费或功能的欠缺。但现在主流的通信协议几乎都能同时实现周期与非周期报文通信。如上所述，周期报文具有较高的时间要求，所以具体的总线规约会对这两类报文的传输安排不同的优先级，使周期报文具有较高的优先级，以保证周期报文的及时送达。但是保证周期报文的优先也要为非周期报文的传递留下适当的带宽，这是在设计或配置具体网络时应注意的，因为现在的网络速度虽然也足够快，但还不是无限的，这个问题应在具体应用时注意，使这两类报文都能正常地送达。

1.4 有连接通信与无连接通信

现代的工业网络普遍使用通信连接的概念，一个连接在网络上的设备，如果要与其他设备通信首先要建立通信连接，所谓连接就是通信的约定，通过连接过程约定了发送者、接收者、传送路径、传送机制、数据包大小、通信频度等。

使用有连接的通信有以下好处：

(1) 同一设备可以建立多个通信连接，这些连接可以使用不同的传输机制，DeviceNet 中的显式报文连接用于非周期报文，隐式报文用于周期的 I/O 数据传送。

(2) 建立连接时对于通信的路径、传输机制、信息包大小、重复传送的周期、超时的动作等属性作了定义，并已被连接各方接受和记录在案，并监视通信的执行，以后就不必再传输，这些规定使信息包简化。

(3) 有连接的报文是以标识符标志的，连接过程已将连接的相关信息（包括标识符）存入相关设备，通过标识符识别报文（而不是简单的源地址、目的地址），很容易实现多播传送（多个接收者同时消费一个报文），这可明显提高网络的效率。在工业控制中现场设备的实时信息往往是多个控制器需要的，传统的源一目的标志的报文传送必须向多个目的重复发送同样的报文。

(4) DeviceNet 的标识符中包含了报文优先级的信息，通过连接标识符的分配，很容易设定各连接的优先顺序，例如为 I/O 报文的连接安排具有较高优先级的标识符。

(5) DeviceNet 使用 CAN 物理层和数据链路层，DeviceNet 的连接标识符就是 11 位 CAN 标识符，这个标识符的识别得到硬件（CAN 芯片）的支持，CAN 芯片通过片内的掩码匹配器（Mask/Match）电路自动捕捉符合所建立的连接标识符的报文，通过掩码的过滤只有属于本节点的报文才会交到节点的控制器处理，这大大降低节点控制器的负担，并有力提高网络的响应速度。

(6) 连接的建立和撤销可以离线或在线执行，因此有连接的通信很容易在网络运行时加入。

(7) 建立连接也是约定了通信资源，通信的带宽是有保证的，因此有连接的通信较稳定。

综合以上特点可知通信连接可以使网络的信息传输更有序，所以现在普遍采用连接通信的管理方法。

1.5 ISO 通信模型

图 2.15-1 是 ISO 通信参考模型，这个模型将整个通信的处理划分为七层，每层表示通信处理的一个部分，实现特

定的功能。分层模型有利于通信功能的模块化和标准化，这对于日渐复杂化的通信协议的理解和实现是有帮助的。



图 2.15-1 ISO 分层模型

ISO 通信模型是表示为七层的模型，但一个通信协议往往并不一定需要具备完全的七层功能，如 DeviceNet 只有物理层、数据链路层和应用层，它的物理层和数据链路层是基于 CAN 协议，这是可由现成芯片提供的，因此 DeviceNet 协议只需说明应用层的规约。

2 低压电器通信与现场总线

2.1 现场总线和通信协议的标准化情况

2.1.1 国际标准

目前市场上正在应用的现场总线很多，国际标准主要归类为两个标准族：一个为 IEC/SC65C 的 IEC 61158 标准，另一个为 IEC17B 的有关低压开关设备与控制设备、控制器与电气设备接口的 IEC 62026 标准。

2.1.1.1 IEC 61158

IEC 61158 第四版中，包含 14 类技术，CIP、PROFIBUS、PROFINET、EPA、MODBUS-RTPS 等国际主流的工业通信技术均包含在其中，EPA 被列入 IEC 61158 中的第十四类型。

2.1.1.2 IEC 62026

IEC 62026 相关的标准有：IEC 62026 低压开关元件与控制设备：控制器与电器设备接口。

IEC 62026-1，总则。

IEC 62026-2，执行器-传感器接口（AS-i）。

IEC 62026-3，DeviceNet。

IEC 62026-6，多路串行控制总线（Seriplex）。

2.1.2 国家标准

2.1.2.1 推荐性标准

AS-i 总线

国家标准号：GB/T 18858.2—2002/ IEC 62026-2；2000

标准名称：低压开关设备和控制设备控制器-设备接口（CDI）第 2 部分：执行器传感器接口（AS-i）。

DeviceNet 总线

国家标准号：GB/T 18858.3—2002/IEC 62026-3；2000

标准名称：低压开关设备和控制设备 控制器-设备接口（CDI）第 3 部分：DeviceNet。

2.1.2.2 行业标准

Profibus 总线

行业标准号: JB/T 10308.3—2001

标准名称: 测量和控制数字数据通信工业控制系统用现场总线 第 3 部分: Profibus 规范。

2.1.2.3 指导性技术文件

Modbus 总线

Modbus 总线的国家标准由三部分组成:

国家标准号: GB/Z 19582.1—2004

标准名称: 基于 Modbus 协议的工业自动化网络规范

第 1 部分: Modbus 应用协议。

国家标准号: GB/Z 19582.2—2004

标准名称: 基于 Modbus 协议的工业自动化网络规范

第 2 部分: Modbus 协议在串行链路上的实现指南。

国家标准号: GB/Z 19582.3—2004

标准名称: 基于 Modbus 协议的工业自动化网络规范

第 3 部分: Modbus 协议在 TCP/IP 上的实现指南。

CC-Link

国家标准号: GB/Z 19760—2005

标准名称: 控制与通信总线 CC-Link 规范。

LONWORKS

LONWORKS 总线的国家标准由四部分组成:

国家标准号: GB/Z 20177.1—2006 (ANSI/CEA—709.1, IDT)

标准名称: 控制网络 LONWORKS 技术规范 第 1 部分: 协议规范。

国家标准号: GB/Z 20177.2—2006 (ANSI/CEA—709.2, MOD)

标准名称: 控制网络 LONWORKS 技术规范 第 2 部分: 电力线信道规范。

国家标准号: GB/Z 20177.3—2006 (ANSI/CEA—709.3, MOD)

标准名称: 控制网络 LONWORKS 技术规范 第 3 部分: 自由拓扑双绞线信道规范。

国家标准号: GB/Z 20177.4—2006 (EIA/CEA—852, IDT)

标准名称: 控制网络 LONWORKS 技术规范 第 4 部分: 基于隧道技术在 IP 信道上传输控制网络协议的规范。

2.2 相关现场总线原理和应用

2.2.1 AS-Interface 现场总线介绍

2.2.1.1 总线特征和适用范围

(1) 总线特征。见表 2.15-1。

表 2.15-1 AS-Interface 现场总线特征	
拓扑结构	总线型、星型、树型
电缆	非屏蔽, 双绞电缆或扁平电缆
访问方式	主从方式
系统可连接 I/O 数目	124I/124O (V2.0), 248I/186O (V2.1)
网络长度	100m(使用中继器可延长到 300m)
传送速度	166.7kbit/s
报文脉冲波形	APM 波形
编码方式	曼彻斯特编码
系统防护等级	IP20, IP65, IP67
数据保护	HD=4

续表

拓扑结构	总线型、星型、树型
系统循环周期	最大 5ms
从站地址	0-31 (V2.0), 0-61 (V2.1)
电源	30V DC, 每个从站供电最大 300mA, 每个系统最大 8A
每个从站连接的设备数(数字, 二进制)	4I/4O(V2.0), 8I/8O(V3.0)
每个从站连接的设备数(模拟)	一个 4 位模拟设备(V2.0)
报文	请求(主站发出)和应答(从站发出)
从站设备描述	IO 码和 ID 码
通信模式	主站按从站地址, 从小到大的周期循环访问从站

(2) 适用范围。AS-Interface 现场总线使用两芯电缆(在电源线上调制信号)和简单的协议, 适用于自动控制和制造领域多层通信结构的最底层。该层主要应用于二进制控制设备的连接和控制, 例如, 传感器、接近开关、按钮、信号灯、执行器、步进电动机、简单的操作面板、开关等。这些设备主要位于加工和制造业工厂的车间流水线, 开采和钻探业的作业现场, 以及其他行业的现场设备层。AS-Interface 现场总线能满足该层领域的最快实时性处理, 高效运行性能, 低成本, 安装和维护简便, 操作容易等要求。

AS-Interface 现场总线的低成本, 适合小规模智能化工控系统的应用。AS-Interface 现场总线也适合对 DCS 系统的改装。

AS-Interface 现场总线的 AS-I Safety (功能安全) 符合 IEC 61508 和 EN 954-1 标准, 适用于需要提供功能安全的设备, 如紧急停止按钮、光隔离带、互连锁、卷帘门电动机等。注意 AS-I Safety 功能安全不能与本质安全系统混淆。

2.2.1.2 通信规约简介

(1) 规约简介。AS-Interface 现场总线符合 GB/T 18858.2—2002, 面向于多层自动控制和制造领域结构的最底层, 是一种用于连接简单二进制信号设备(如执行器、传感器)的现场总线协议。与其他现场总线相比, AS-Interface 现场总线强调提供一个简单高效的服务“接口”。

AS-Interface 现场总线采用双芯非屏蔽电缆, 同时传输电源和数据, 系统不需要终端电阻, 可用线性、星型、树型连接。

AS-Interface 现场总线采用主从通信方式, 每个线段由一个主站和若干从站组成。主站监控网络, 错误检测; 对从站发出数据或命令和与上位机通信。从站接收主站的请求和命令, 报告设备状态, 管理与其连接的设备。系统构成如图 2.15-2 所示。

(2) 数据编码。AS-Interface 现场总线采用曼彻斯特编码反码方式 (Manchester II) 在电缆上传输数据。报文传输速率为 1662/3kbit/s, 每一个位 (bit) 的位时间为 6μs。曼彻斯特编码反码方式在每个位时间内变换一次电平。一个数字“1”为 3μs 的低电平后紧跟着 3μs 的高电平, 一个数字“0”为 3μs 的高电平后紧跟着 3μs 的低电平。

一个典型的数据编码如图 2.15-3 所示。在总线电缆上传输的实际电流和电压波形 (见图 2.15-3), 它叫做脉冲调制波形 (APM 波形)。APM 波形的理想电压方程为

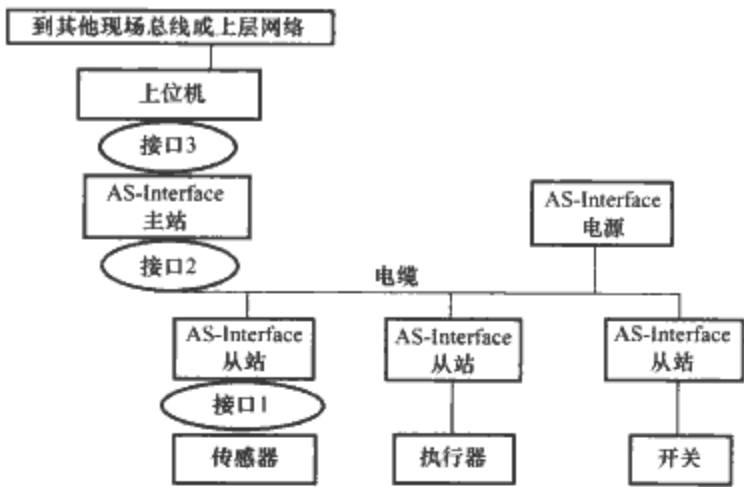


图 2.15-2 AS-Interface 系统构成

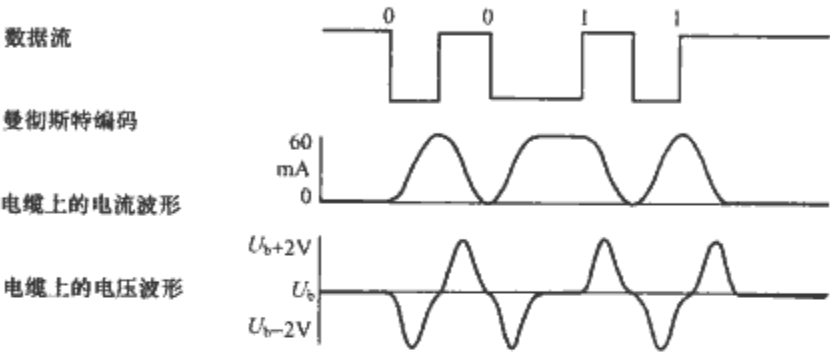


图 2.15-3 典型的数据编码

$$u(t) \approx \pm U_{send} \sin\left(\frac{2\pi}{6\mu s}\right) \quad (2.15-1)$$

U_{send} 约为 2V DC。脉冲调制波形 (APM 波形) 是通过 ASI 节点控制芯片的信号电流脉冲在 ASI 电源总线 (即信号总线) 上的去耦合电路来实现的, 简单的去耦合电路就是串联在电缆线上的电感。通过电感可以把主站或从站发出的数字数据转换为叠加在电源线上的交变电压, 经隔直、放大、处理形成曼彻斯特码信号。

(3) 数据报文格式。正常运行时 AS-Interface 现场总线周期交换数据报, 数据报文由主站请求报文和从站响应报文组成, 报文格式如下 (1 位为 1bit);

主站请求

起始 (1 位)	控制 (1 位)	地址 (5 位)	信息 (5 位)	奇偶校验位 (1 位)	结束 (1 位)
-------------	-------------	-------------	-------------	----------------	-------------

从站响应

起始 (1 位)	信息 (5 位)	奇偶校验位 (1 位)	结束 (1 位)
-------------	-------------	----------------	-------------

以上各字段的具体含义以及主站请求和从站响应不同类型的数据报文定义请参见规约。

数据报文举例:
主站对 1 号地址从站发送数据交换命令, 发送报文的信息字段同时夹带从站的输出数据。

0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

1 号地址从站发送对主站数据交换命令的响应, 报文的信息字段同时夹带从站的输入数据。

0	0	1	0	1	1	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

(4) 设备描述和配置。
1) I/O 码和 ID 码。AS-Interface 现场总线使用一个 4bit 的 I/O 代码和一个 4bit 的 ID 代码来描述从站设备的类型。(V2.1 版本增加了一个可选用的 4bit 的扩展 ID-2 代码, 作为 ID 代码的补充)

I/O 代码描述的是从站所能支持的输入输出点数, 以及它们的传输方向 (输入、输出、双向、三态)。如 I/O=8, 4 点输出; I/O=F, 4 点三态。

ID 代码描述的是从站的设备类型。如 ID=1, 传感器从站; ID=D, 电动机控制器。

I/O 代码和 ID 代码组合成一个 8bit 的字节, 作为从站的设备描述, 存储在从站的软件中。主站通过首先检查从站的 I/O 代码和 ID 代码, 确认所通信的从站设备是否与主站中的从站设备的设定一致。只有两者一致的从站才能和主站进行数据交换。

AS-International Association 组织制定了一个从站描述 (Slave Profiles), 相当于其他现场总线的设备行规, 其中对各种由 I/O 代码和 ID 代码组合确定类型的从站设备, 详细规定了设备的各项功能和性能要求。

2) 系统配置。

从站配置: 从站模块通过手持式编址器或 AS-Interface 编程设备配置从站地址、IO 码和 ID 码。IO 码和 ID 码一般在产品出厂前完成。地址站号 “0” 是默认地址, 作为产品出厂时的默认配制地址。从站模块在接入系统前应改变地址站号, 使之不为 “0”。

主站配置: 主站模块配置主站的地址站号, 系统中的所有从站的配置信息。一般通过上位机把主站配置信息下载到主站的存储器中。主站有两种工作模式, 运行模式和配置模式。配置模式用于系统的搭建阶段。在配置模式下, 主站忽略配置信息不对的从站、掉线的从站和不在主站的配置信息中的从站。运行模式用于系统的正常工作, 该模式下, 主站只在系统内实际连接的从站的配置信息和主站内的配置信息一致的情况下, 才正常运行。

系统的一般配置过程: ①确定系统构成。为主站确定地址, 为从站模块确定地址、IO 码和 ID 码。②配置从站。为从站配置地址站号、IO 码和 ID 码。③配置主站。配置主站的地址。为主站配置系统中所有从站的配置信息。④系统配置检测。主站轮询从站, 确定存储器中的系统从站配置信息和从站实际配置的信息一致, 不一致将报告错误。⑤系统运行。主站确定无错 (运行模式) 或忽略配置错误的从站 (配置模式) 后, 运行上位机或主站中的系统工作程序 (如系统 PLC 程序)。

从站配置方法: 从站模块通过手持式编址器或 AS-Interface 编程设备配置从站地址、IO 码和 ID 码。IO 码和 ID 码一般随产品固定, 由产品生产方在产品出厂前烧写, 用户不需修改。地址站号 “0” 是默认地址, 作为产品出厂时的默认配制地址。从站模块在接入系统前应改变地址站号, 使之不为 “0”。

2.2.1.3 用于低压电器领域的优缺点

(1) AS-Interface 现场总线用于低压电器领域的主要优点是:

- 1) 低成本。系统的布线和设备安装费用大大低于传统的 PLC 和其他现场总线。
- 2) 抗干扰能力强。系统采用曼彻斯特码传输方式能抑制噪声干扰。系统适用于 IP67 的应用要求。
- 3) 易安装和维护。可采用电缆穿刺技术, 把从站或主站设备连接到总线上。从站拔出后, 电缆上留下的两个小孔能够自动闭合。方便设备的安装与更换。

系统可工作在配置模式下, 即使有从站出现故障, 系统仍能正常运行。更新后的从站能立即自动上线工作。

(2) AS-Interface 现场总线的缺点:

1) 不适用于大型网络。对于一个中型或大型的系统网络，位于系统结构底层的 AS-Interface 现场总线一般需要使用网关和上层现场总线系统连接。

2) 传输距离短。AS-Interface 现场总线的最大传输距离是 300m，超出该范围的系统将分割成多个小系统。

3) IO 点数较少。每个从站支持的 IO 点数较少，也不适用较高分辨率要求的模拟量设备。

2.2.2 Modbus 现场总线介绍

2.2.2.1 总线特征和适用范围

Modbus 协议是可应用于电子控制器上的一种通用的通信协议。通过此协议，控制器相互之间、控制器经由网络和其他设备之间可以通信。Modbus 协议最初由 Modicon 公司开发，在 1979 年末该公司成为施耐德自动化 (Schneider Automation) 部门的一部分。从 1979 年开始，Modbus 作为工业串行链路的事实标准，Modbus 使成千上万的自动化设备能够通信，现在 Modbus 已经是工业领域全球非常流行的协议，已经成为一通用工业标准。许多工业设备，包括 PLC、DCS、智能仪表等都在使用 Modbus 协议，作为他们之间的通信标准，有了它，不同厂商生产的控制设备可以连成工业网络，进行集中监控。

Modbus 协议主要特征包括：

- (1) 数据通信采用主从方式。
- (2) 协议没有指定物理层，可以使用不同的物理接口，推荐为 RS485 接口。
- (3) 协议包括两种传输模式 (ASCII、RTU)，并规定了报文、数据的结构、命令和应答的方式。
- (4) Modbus 协议规定了对数据的校验方法，串行协议中除有奇偶校验外，ASCII 模式采用 LRC 校验，RTU 模式采用 16 位 CRC 校验。

2.2.2.2 通信规约简介

Modbus 协议包括了三层协议：OSI 模型第七层上的应用协议，OSI 模型第二层上的串行链路协议，在物理层，Modbus 系统可以使用不同的物理接口。

(1) Modbus 物理层。Modbus 系统可以使用不同的物理接口，包括 RS485、RS232。最常用的物理接口是 TIA/EIA-485 (RS485) 两线制接口。当只需要短距离的点到点通信时，也可以使用 TIA/EIA-232-E (RS232) 串行接口作为 Modbus 系统的物理接口。

在使用典型的 RS485 两线制接口的 Modbus 系统中，在一条由 3 根导线组成的干线电缆上连接所有设备。其中两条导线形成一对平衡双绞线，在整个双绞线上双向传送数据，在这个两线总线上，在任何时候只有一个驱动器有权发送信号，第 3 条导线可以将总线上所有设备相互连接成公共端，可以将公共端直接连接到保护地上。

Modbus 多点串行链路系统由主电缆 (干线) 和一些可能的分支电缆组成。在干线电缆的两端需要线路终端以使阻抗匹配。在任何没有中继的 RS-485Modbus 中，允许最多有 32 台设备。数据信号传输的典型速率为 9600bit/s 和 19 200 bit/s，另外可以有选择地实现其他波特率 (bit/s)：1200，2400，4800，…，38 400，56k，…。波特率为 9600bit/s、AWG26 (或更粗) 的电缆，其最大长度为 1000m，分支必须短，不能超过 20m。

(2) Modbus 数据链路层。Modbus 串行链路协议是一个主-从协议。只能有一个主站，一个或多个从站连接到一个串行链路。Modbus 通信总是由主站发起。当没有收到来自主站的请求时，从站不能发送报文。即从站不能发起通

信，因此从站之间不能相互通信。主站同时只能起动一个 Modbus 事务处理。

Modbus 定义了两种串行传输模式：RTU 模式和 ASCII 模式。只有每个设备设置为相同的模式才能进行 Modbus 设备之间的相互操作，所有设备必须实现 RTU 模式，ASCII 传输模式是一个选项。

RTU 传输模式时，报文每个 8 位字节包含有两个 4 位十六进制字符 (ASCII 方式只表示一个字符)。这种模式的主要优点是在相同的波特率下其较高的字符密度具有比 ASCII 模式更高的吞吐率。

RTU 模式中每个字节 (11 位) 的格式为：

- 1) 1 个起始位。
- 2) 8 个数据位，最低的有效位先发送。
- 3) 1 个奇偶校验位，无校验则无。
- 4) 1 个停止位 (有校验时)，2 个停止位 (无校验时)。

在 RTU 模式中，长度至少为 3.5 个字符时间的空闲间隔将报文帧区分开。如果一个新报文在小于 3.5 个字符时间内接着前个报文开始，接收的设备将认为它是前一报文的延续。这将导致一个错误，因为在最后的 CRC 字段的值不可能是正确的。传输的报文帧第一个字段是设备地址，第二个字段为功能码，第三个字段为数据，第四个字段为差错校验字段，RTU 模式中该字段是基于 16 位循环冗余校验 (CRC) 方法对全部报文内容执行的，发送时 CRC 校验的低字节在前，高字节在后。整个报文帧必须作为一连续的流传输。如果两个字符之间的空闲间隔大于 1.5 个字符时间，那么认为报文帧不完整，并且接收设备应该丢弃整个报文帧。一个典型的 RTU 报文帧：

起始位	设备地址	功能代码	数据	CRC 校验	结束符
≥3.5 字符	8 位	8 位	n 个 8 位	16 位	≥3.5 字符

当使用 ASCII (美国信息交换标准代码) 模式设置设备在 Modbus 串行链路上通信时，用两个 ASCII 字符发送报文中的一个 8 位字节。

ASCII 模式中每个字节 (10 位) 的格式为：

- 1) 1 个起始位。
- 2) 7 个数据位，最低的有效位先发送。
- 3) 1 个奇偶校验位，无校验则无。
- 4) 1 个停止位 (有校验时)，2 个停止位 (无校验时)。

使用 ASCII 模式，一个报文帧必须以冒号 (:) 字符 (ASCII 码 3AH) 作为起始位，以回车-换行符结束 (ASCII 码 0DH, 0AH)。对于所有的字段来说，允许传输的字符是十六进制的 0…9，A…F。报文帧的第一个字段是设备地址，包括两个字符，第二个字段为功能码，第三个字段为数据，第四个字段为差错校验字段，ASCII 模式中该字段是基于对全部报文内容执行的纵向冗余校验 (LRC) 计算结果，不包括起始“冒号”和结束 CRLF 对。整个报文中字符间发送的时间间隔最长不能超过 1s，否则接收的设备将认为传输错误。一个典型的 ASCII 报文帧：

起始位	设备地址	功能代码	数据	LRC 校验	结束符
1 个字符	2 个字符	2 个字符	0~2×252 个字符	2 个字符	2 个字符 CR、LF

(3) Modbus 应用协议。Modbus 协议定义的报文帧包括四个字段：地址字段、功能码字段、数据字段、差错校验字

段。地址字段指定了报文帧发送给哪个从站，功能码向从站指示将执行哪种操作，数据字段为传送的具体数据，差错校验字段用于检测报文帧。

Modbus 地址字段为一个字节，空间由 256 个不同地址组成，0 为广播地址，1~247 为从站单个地址，248~255 保留。

Modbus 功能码字段为一个字节，一共能够可以分为三类：公共功能码，用户定义的功能码（65~72，100~110），保留功能码。常用的功能码主要有三种：03（读多个寄存器），06（写单个寄存器），16（写多个寄存器），这三种功能码都采用 16 位访问，发送时高字节在前，低字节在后。

数据字段为主站与从站需要交换的数据。如果在一个正确接收的 Modbus 报文帧中，不出现与所请求的 Modbus 功能有关的差错，那么从站到主站的相应数据字段包含所请求的数据。如果出现与所请求的 Modbus 功能有关的差错，那么数据字段包含一个异常码，从站应能够使用这个字段确定下一个执行的操作。

差错校验字段由 2 个字节组成，根据 Modbus 两种不同的串行传输模式 RTU 模式和 ASCII 模式，可以为 CRC 校验字段或者 LRC 校验字段。

（4）设备描述。Modbus 没有设备描述，所以当从一个从站设备连接到一个 Modbus 网络时，主站不能确定此设备的类型。

2.2.2.3 用于低压电器通信的优缺点

Modbus 用于低压电器通信的优点主要包括：

（1）成本低，系统的布线和设备的安装费用大大低于其他现场总线。

（2）开发简单，由于 Modbus 应用协议较为简单，所以要把低压电器设备连接到 Modbus 网络上，所要增加的开发时间和费用都是非常少的。

Modbus 现场总线的缺点：

（1）通信速度较低，在一个典型的 RS485 Modbus 网络中，数据信号传输的典型速率为 9600bit/s 和 19 200bit/s。

（2）由于主站同时只能起动一个 Modbus 事务处理。主站对一个从站的询问必须等待它的应答才能处理下一个事务，而且 Modbus 只定义了询问和应答顺序，没有定义节点的应答时间要求，这种无时间约束的设备的通信组合，使它无法保证总线的实时性能。

（3）没有设备描述，主站不能确定连接在 Modbus 网络上的从站设备的类型，这使得产品的标准化程度不高，网络设备间的互操作性和互换性不佳，系统集成能力不高。

2.2.3 DeviceNet 总线介绍

2.2.3.1 总线特征和适用范围

DeviceNet 的主要技术特点如表 2.15-2 所示。

表 2.15-2 DeviceNet 主要技术特点		
网络大小	最多 64 个节点	
网络长度	可选的端一端网络长度随网络传输速度变化	
	波特率 (bit/s)	距离 (m)
	125k	500 (1640ft)
	250k	250 (820ft)
	500k	100 (328ft)
网络模型	生产者/消费者模式	
数据包	0~8 字节	
总线拓扑结构	线性（干线/支线）； 电源和信号在同一网络电缆中	
总线寻址	带多点传送（一对多）的点对点；多主站和主/从； 轮询或状态改变（基于例外）	
系统特性	支持设备的热插拔，无需网络断电	

DeviceNet 是由美国 Rockwell 公司在 CAN 基础上推出的一种低成本的通信总线，是一种低端网络系统。它将基本工业设备（如限位开关、光电传感器、阀组、电动机起动器、过程传感器、条形码读取器、变频驱动器、物料流量计、电子秤、显示器和操作员接口等）连接到网络，从而避免了昂贵和繁琐的硬接线。DeviceNet 是一种简单的网络解决方案，在提供多供货商同类部件间的可互换性的同时，减少了配线和安装工业自动化设备的成本和时间。DeviceNet 的直接互连性不仅改善了设备间的通信，而且同时提供了相当重要的设备级诊断功能。图 2.15-4 所示为一个典型的 DeviceNet 控制系统示意图。

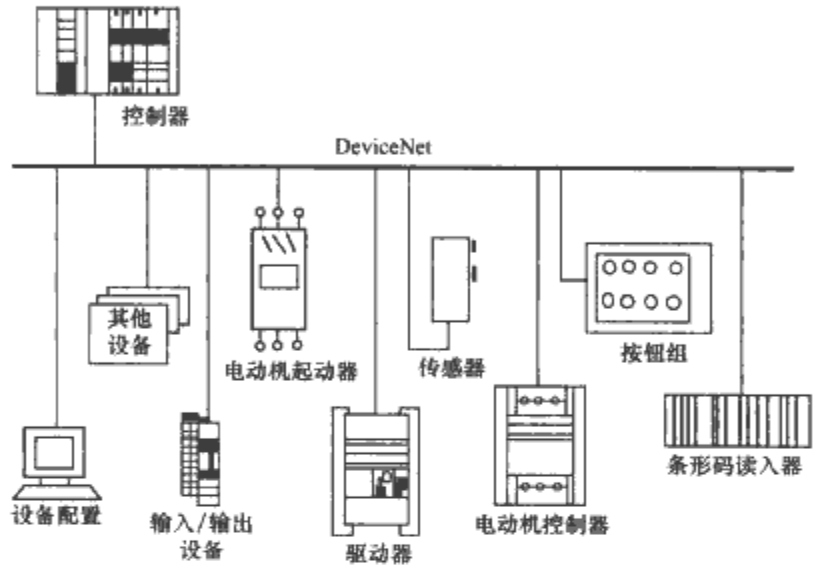


图 2.15-4 DeviceNet 控制系统示意图

DeviceNet 是一个开放性的协议，它在美国和亚洲扮演了非常重要的角色，在欧洲越来越多的系统方案使用 DeviceNet。在世界范围内，有超过 300 多家著名自动化设备厂商的会员（如罗克韦尔自动化、ABB、欧姆龙）。其应用范围包括：汽车、半导体芯片制造、电子产品制造、食品和饮料、批量生成、化学处理、装配、包装和物料转移等。

DeviceNet 自 2002 年成为中国国家标准后，已在冶金、电力、水处理、乳品饮料、烟草、水泥、石化、矿山等各个行业得到成功的应用。国内 ODVA 会员也纷纷推出具有自主知识产权的产品。

2.2.3.2 DeviceNet 通信协议简介

（1）DeviceNet 与 CIP、CAN 的关系。CIP 协议是通用工业协议的简称，是面向对象的工业网络控制协议。根据 OSI/ISO 七层协议模型，DeviceNet 协议定义了七层模型中的一部分，即物理层、数据链路层和应用层。而 CIP 协议是七层模型中的最上层—应用层。具体 CIP 协议架构见图 2.15-5。在图中我们清楚地看到 CIP 协议是 DeviceNet 的应用层，同时是 ControlNet、EtherNet/IP、CompoNet 的应用层，因此 DeviceNet 和 ControlNet、EtherNet/IP、CompoNet 共用同一个应用层协议 CIP，但它们都有各自的数据链路层和物理层。

DeviceNet 协议的数据链路层利用的是 CAN 协议，这样使得 DeviceNet 协议更具有可靠性和抗干扰性。CAN 总线技术能够以较低的成本、较高的实时处理能力在强电磁干扰环境下可靠地工作。CAN 总线具有以下优势：

- 1) 是广播式的串口通信方式，用 11 位 CAN 标识符标识数据报代替了站地址编码，通过 CAN 芯片的掩码 (Mask/Matsh) 过滤器滤去无关的报文，实现高速响应。
- 2) 采用了非破坏性仲裁技术，有效地避免了总线冲突，实现访问的优先级。

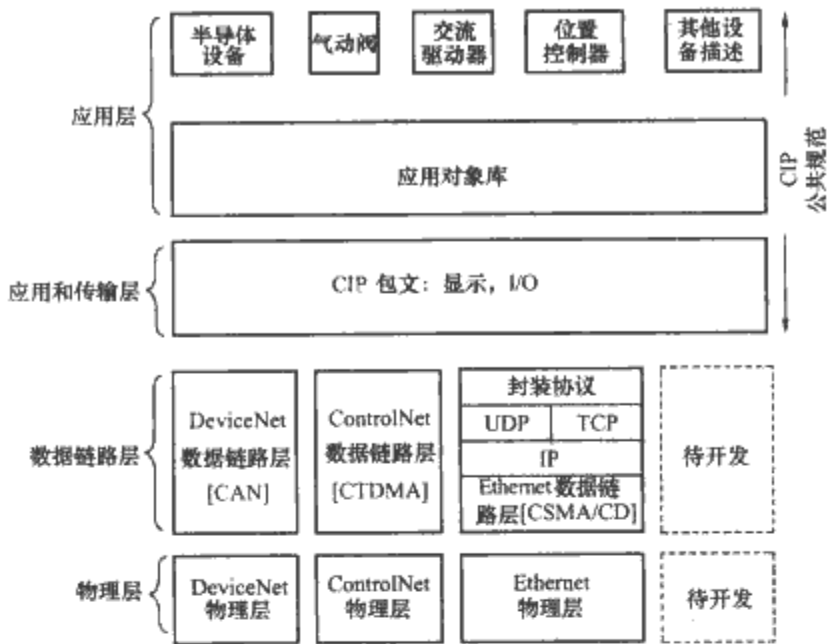


图 2.15-5 CIP 协议架构

CAN 的无损位仲裁算法，在解决总线冲突方面是相当出色的。在随机访问方式中，常用的 CSMA/CD（载波监听多路访问/冲突监测）技术，在处理冲突时，发生冲突的节点一旦监测到冲突，就全部立即停止发送，没有有效报文继续发送，而无损位仲裁算法可以使优先权较高的节点继续发送有效报文，提高了总线利用率，这是非常重要的。“显性”电平和“隐性”电平同时在总线上传送时，总线电平表现为“显性”电平，11 位标识符按照从最高位到最低位的顺序发送，因此具有最低值的标识符具有最高的仲裁优先权，用户可以分配较高的标识符给实时性要求高的报文，提高其仲裁优先权，保证实时性。CAN 的 11 位无损仲裁字段见图 2.15-6。

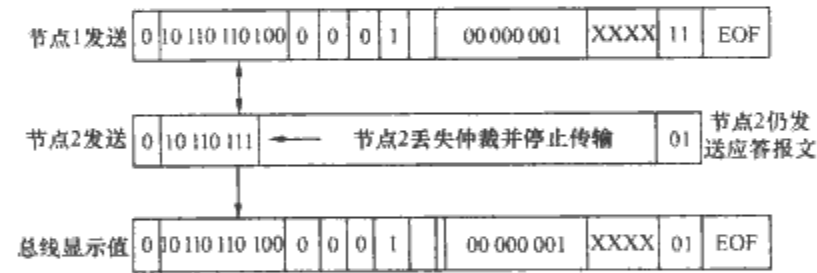


图 2.15-6 CAN 的 11 位无损仲裁字段

- 3) 采用短帧结构，数据传输时间短，响应快，重新发送的时间短。
- 4) 每帧数据都有校验，保证数据传输的可靠性和抗干扰能力。
- 5) 在节点错误严重的情况下，可以进入离线状态，不影响其他节点。

DeviceNet 继承了 CAN 总线技术的所有优点，因此 DeviceNet 总线具有高可靠性、短帧传输等 CAN 总线具有的优点。

(2) DeviceNet 对象模型。DeviceNet 采用对象模型来描述设备（见图 2.15-7），将设备的功能分解成逻辑相关的子集—对象。一个设备被描述成对象的集合，而每个对象的行为都有确切的定义。在对象的集合中，有 DeviceNet 的必需对象和可选对象。

对象的格式。对象是按照类划分的，特性不同的对象属于不同的类，特性相同的对象属于相同的类。属于同一类的一个对象成为该类的一个实例。实例是用来区分同一类中的各个对象的。对象中的数据项称为属性，同类对象具有相同的属性，但属性值可能相同，也可能不同。服务是对象执行的具体任务，或者说是对象支持的功能。服务是通过显式报文传送的。

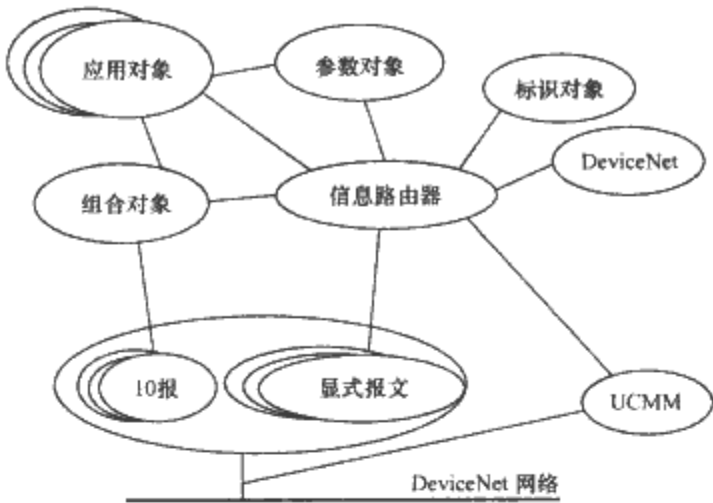


图 2.15-7 DeviceNet 对象模型

(3) DeviceNet 设备描述。设备描述定义了设备的通信特性，目的是为了提高设备间的互操作性和互换性，提高系统集成能力。通过采用设备描述，使各供货商或各网络的设备行为能够一致。设备描述主要从以下几个方面描述了设备类型：

- 1) 设备包含的必需对象和可选对象的组合，以及相互之间的关系。
- 2) 规定了设备类型的 I/O 数据格式。
- 3) 设备的配置数据。

DeviceNet 很早就推出了对象库和设备描述文件，使得设备的互操作性和互换性大大提高，使产品更加标准化。

(4) DeviceNet 通信模式。DeviceNet 采用高效灵活的数据交换机制，称为生产者/消费者模式。DeviceNet 率先引入这种通信模式，在工业控制领域至今没有被超过。采用了这种生产者/消费者模式，大大地减少了网络的负荷，提供了更多功能，增加了信息流量。在该模式中，有生产者和消费者。生产者是发送数据的节点，生产者向网络上发送数据包，数据包带有数据内容的“唯一”的标识符。消费者是在网络上接收数据的节点。消费者根据数据包的标识符判断是否需要接收该数据包，因此，多个消费者可以同时使用一个数据包，从而实现多点传输。

生产者/消费者模式与源/目的模式。源/目的模式中，所有数据都有唯一的源和目的，是一种点对点的传输，由于数据到达各节点的时间不同，节点同步很难实现，不能实现多点传输，浪费了带宽。而生产者/消费者模式，多各节点可以同时消费来自同一生产者的相同数据，可以实现节点同步，同时更有效的利用了带宽，更高的确定性和可重复性。

DeviceNet 是一个基于连接的网络，但也同时支持利用无连接的报文进行建立连接。一个 DeviceNet 连接提供了多个应用之间的路径，每建立一个连接，就分配一个连接 ID，如图 2.15-8 所示。

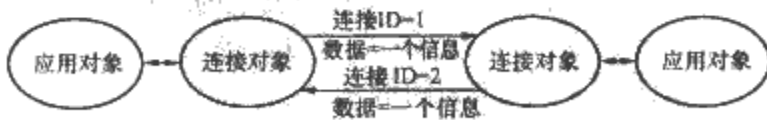


图 2.15-8 连接与连接 ID

连接是为应用对象同其他节点通信保留必要的资源，提高传输报文的处理。连接是有限的资源，会被用完或耗尽。基于连接的报文可以用来传输 I/O 数据和显式报文，支持高效的生产者/消费者传输机制，支持多点传输，一次向多个目的节点进行高效的数据传输。任何类型的连接都提供连接定时机制，当连接定时器超时，连接关闭，释放连接资源。

DeviceNet 协议利用 CAN 的 LLC 数据帧中的 11 位标识符作为连接标识符 CID。DeviceNet 将 CAN 的 11 位标识符分为四组，如表 2.15-3 所示。

表 2.15-3 DeviceNet 对 CAN 11 位标识符的分组

标识符											16 进制 范围	标识用途
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0		
0	组 1 报文 ID				源 MAC ID						000~3FF	报文组 1
1	0	MAC ID					组 2 报文 ID				400~5FF	报文组 2
1	1	组 3 报文 ID			源 MAC ID						600~7BF	报文组 3
1	1	1	1	1	组 4 报文 ID(0~2F)						7C0~7EF	报文组 4
1	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	7F0~7FF	无效 CAN 标识符
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0		

显式报文用于点对点、客户—服务器类传输。服务器端与信息路由器对象绑定，通过信息路由器可以访问所有内部资源，获取或修改某些属性值。客户端与客户应用对象绑定，客户端向服务器发送请求。显式报文主要用于设备配置、诊断和数据采集。

隐式报文，即周期性的 I/O 报文，主要用于传送应用特定的 I/O 数据，如组合对象就是一个应用对象，该应用对象将设备中多个不同的对象的数据采集、组合成一个结构数据。在隐式报文中没有协议信息，全部是应用数据，意味着更高效的信息传送。隐式连接使用唯一的连接标识符，称作连接 ID，来标识数据包。数据的格式是通过设备描述文件和 EDS 文件事先定义好的。隐式报文支持传输触发，基于时间周期（周期触发）或数值变化（状态改变）。连接的定时机制来监视连接的状态，当连接超时，及时向连接关系端的应用报告这一情况。隐式报文都是基于连接的，没有无连接的隐式报文。隐式报文主要用于采集实时 I/O 数据、功能性安全数据和运动控制数据等。

(5) 设备配置。DeviceNet 提供了多种设备配置方式，有传统的打印数据文档、EDS 文档、参数对象和组合对象等方式，也可以通过硬件的方式进行配置。其中电子数据文档（EDS）是 DeviceNet 非常强大的配置机制。

制造商提供的文本形式的文件，供组态工具识别设备。EDS 文件是用 ASCII 码编写的，描述了设备中可以通过网络访问的所有信息，主要内容包括 I/O 数据的结构和含义、I/O 的传输类型、配置参数等信息。EDS 的结构包括文件描述、设备描述、I/O 特性、参数类、参数等。

2.2.3.3 DeviceNet 应用在低压电器的优缺点

现场总线系统的诞生与推广使智能化低压电器功能得以充分发挥，低压电器迅速向着可通信性、可靠性、智能化方向发展。目前，国际上应用在低压电器上的现场总线有 DeviceNet、Profibus、AS-I、Modbus 协议等。这里主要讲述 DeviceNet 应用在低压电器的情况。

DeviceNet 是一个开放的通信协议，全球提供 DeviceNet 产品的厂商多达 500 多家。各个厂商的 DeviceNet 产品都必须通过一致性测试，从而同类产品具有进行互操作性和互换性，使得系统集成方便。

(1) DeviceNet 总线技术应用在低压电器具有的优势：
1) DeviceNet 是一种低成本的通信网络。通过该通信链接，避免了昂贵和繁琐的硬接线，并可以实现高效可靠的数据交换。

2) DeviceNet 总线是基于 CAN 总线的，继承了 CAN 总线的短报文帧传输、无破坏性的总线仲裁技术，为网络通信提供了一种实时高可靠性的方法。

3) DeviceNet 总线技术提供了设备级的诊断功能，使得低压电器具有自诊断功能。

4) DeviceNet 是一个开放式网络标准。用户对设备可进行最佳系统集成，节省了安装和调试的费用。

5) DeviceNet 总线技术提供了多种通信方式，点对点、多主或主从通信方式。

6) Devicenet 总线采用总线供电方式，使得电源连接方便，节省硬接线。

(2) 国外大部分专家认为，从目前技术水平看没有绝对先进的现场总线。即使 DeviceNet 总线在应用到低压电器具有很多优势，但也存在一些不足：

1) DeviceNet 网络通信速率较低，不适合大量数据的传输。DeviceNet 总线支持的最高波特率是 500kbit/s。

2) DeviceNet 是基于 CAN 总线技术的，每帧的最大数据为 8 个字节，对于大量数据传输时，传输效率较低。

3) DeviceNet 网络最多支持 64 个节点，对于一个节点数目较大的大系统时，不能够满足要求，需要多主站运行。

4) 传输距离较短。DeviceNet 总线传输距离与传输速率成反比，即传输速率越高，其传输距离越短，当传输速率是 500kbit/s 时，传输距离是 100m。

DeviceNet 总线技术应用在低压电器上是比较适合的，从总线系统与通信接口制造成本、系统组态灵活性、低压配电系统通信可靠性和国内制造商采用总线技术方便性考虑，DeviceNet 总线技术具有相当的优势。

2.2.4 Profibus 总线

2.2.4.1 总线特征和适用范围

(1) 适用范围。Profibus 由 Siemens 公司提出并极力倡导，现已成为欧洲首屈一指的开放式现场总线系统，欧洲市场占有率大于 40%。1996 年 6 月 Profibus 被采纳为欧洲标准 EN50170 第二卷。PNO 为其用户组织。Profibus 是一种比较成熟的总线，广泛应用于加工制造自动化、过程控制自动化、楼宇自动化、发电与输配电等领域。

(2) 主要特征。Profibus 以 ISO7498 为基础，以开放式系统互连网络 OSI 作为参考模型，定义了物理传输特性、总线存取协议和应用功能。Profibus 包括 Profibus-DP、Profibus-PA、Profibus-FMS。Profibus-DP (Decentralized Periphery) 是一种高速和便宜的通信连接，用于自动控制系统和设备级分散的 I/O 之间进行通信。Profibus-FMS (Field-Bus Message Specification) 用来解决车间级通用性通信任务，与 LLI (LowerLayerInterface) 构成应用层。Profibus-PA (Process Automation) 专为过程自动化而设计的，它可使传感器和执行器接在一根共用的总线上。当使用电缆耦合器，Profibus-PA 装置能很方便的连接到 Profibus-DP 网络。目前，就低压电器领域而言，一般只采用 Profibus-DP 总线，主要技术特征如下。

1) 传输技术。① 依据 RS485，采用异步 NRZ 传输方式；② 网络拓扑为线型、树型和星型，两端有终端电阻；③ 采用屏蔽双绞电缆，也可取消屏蔽，取决于环境条件；或者采用光纤；④ 每分段 32 个站（不带中继器），带中继器可多到 126 个站，每段的头和尾必须带有终端电阻；⑤ 传输速率为 9.6k~12Mbit/s，电缆最大长度取决于传输速率，如表 2.15-4 所示。

表 2.15-4 传输速率与长度对照

波特率(kbit/s)	9.6	19.2	93.75	187.5	500	1500	12000
距离(m)	1200	1200	1200	1000	400	200	100

2) 设备类型。第一类 DP 主站 (DPM1) 是中央可编程控制器, 如 PLC、PC 等。第二类 DP 主站 (DPM2) 是可进行编程、组态、诊断的设备。DP 从站是带二进制值或模拟量输入输出的 RTU、驱动器、阀门等。

3) 总线存取。支持单主站或多主站系统。多主站系统中主站间采用令牌传递, 主站与从站间为主-从轮询方式。

4) 通信。点对点 (用户数据传送) 或广播 (控制指令)。循环主-从用户数据传送和非循环主-主数据传送。

5) 功能。DP 主站和 DP 从站间进行周期性数据传输和非周期性数据传输; 具有强大的诊断功能, 主站能向从站发送参数数据, 每个 DP 从站的输入和输出数据最大为 244 字节, 控制指令允许输入和输出同步。

6) 可靠性和保护机制。所有信息的传输按海明距离 HD=4 进行, DP 从站带看门狗定时器 (Watchdog Timer), 可对 DP 从站的输入/输出进行存取保护, 可用主站中可调节的监视定时器来监视用户数据通信。

2.2.4.2 通信规约简介

Profibus 协议的结构是以开放式系统互连网络 (OSI) 作为参考模型的。Profibus-DP 使用了 OSI 参考模型的第一层、第二层和用户接口, 第三层到第七层未定义。这种结构确保了数据传输快速和有效地进行。Profibus-DP 协议结构见图 2.15-9。

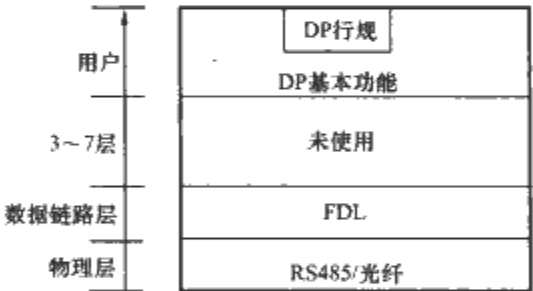


图 2.15-9 Profibus-DP 协议结构

Profibus-DP 用于总线主站与其所属的从站设备之间进行简单、快速、循环和时间确定性的过程数据的交换。最初的版本为 DP-V0, 现已扩展到 DP-V1、DP-V2。DP-V0 提供了 DP 的基本功能, 包括循环的数据交换, 以及站诊断、模块诊断和特定通道诊断; DP-V1 包含依据过程自动化的需求而增加的功能, 特别是用于参数赋值、操作、智能现场设备的可视化和报警处理等的非循环数据通信; DP-V2 包括主要根据驱动技术的需求而增加的其他功能, 如同步从站模式和从站对从站通信等。

设备描述: 为了将不同厂家生产的 Profibus 产品集成在一起, 生产厂家必须以 GSD 文件 (电子设备数据库文件) 方式表示这些产品的功能参数 (如 I/O 点数、诊断信息、波特率等)。标准的 GSD 数据将通信扩大到操作员控制级。根据 GSD 文件, 组态工具可将不同厂商生产的设备集成在同一总线系统中。GSD 文件是一个可读的 ASCII 文件, 可使用 Profibus 用户组织提供的编辑工具 GSDEdit 进行编辑, GSD 文件是由若干行组成, 每行都用一个关键字开头, 包括关键字及参数 (无符号数或字符串) 两部分。

2.2.4.3 用于低压电器通信的优缺点

根据低压电器产品和低压配电与控制系统特点, 目前重点选择 Profibus、DeviceNet、Modbus、Asi 四种总线应用于

低压电器领域。

Profibus 应用于低压电器的主要优点:

(1) 与其他现场总线相比, Profibus 的最大优点在于具有稳定的国际标准 EN50170 作保证, 并经实际应用验证具有普遍性。

(2) Profibus 拥有全球最多的供货厂商数。国内开发生产 Profibus 产品的厂商逐年递增, 在国内第一个取得了行业标准 JB/T 10308.3—2001《测量和控制数字数据通信工业控制系统用现场总线 第 3 部分: Profibus 规范》, 并且有能够进行国际认证的实验室, 这些都表明 Profibus 在国内已经得到了很好的发展。

(3) Profibus-DP 总线通信速率较高, 速率选择范围较大。每个从站输入/输出数据最大可传输 244 个字节, 因此每个总线周期可传输的数据量比较大。

(4) 低压电器的参数比较多, 因此需要传输的数据很多, 而有些参数实时性要求并不高, 针对这一特征, Profibus-DP 采用周期性数据交换方式来处理实时性要求较高的参数, 采用非周期数据交换方式来处理实时性要求不高的数据, 这样大大提高了总线上的数据传输效率。

(5) Profibus 总线的主要缺点是协议比较复杂, 波特率高, 一般需要采用专用协议芯片实现, 这样就造成技术开放性不够, 而且成本较高。

2.2.5 LonWorks 总线介绍

LonWorks (Local Operating Networks) 是由美国 Echelon 公司于 1991 年推出的一种通用测控网络, 它是一种完整的、可互操作的、成熟的分布式控制网络技术。LonWorks 现已成为 ANSI 美国国家标准。欧洲也已纳入相应 CEN TC247 标准以及最新的控制网络协议 CNP 标准和 prEN 14908《楼宇控制标准》。

LonWorks 技术现已广泛应用于现代化楼宇、工厂、交通运输系统、城市基础设施 (水、电、气等)、家庭自动化系统的分布式控制网络中。目前, 世界著名的楼宇控制公司, 如 Honeywell 霍尼韦尔, Schneider 施耐德旗下的 t. a. c, Johnson 江森, 西门子等都在采用 LonWorks 技术生产楼控产品。

LonWorks 技术的主要特点是:

(1) 开放性、互操作性。LonWorks 的通信协议 LonTalk 协议是 IEC 60730-1 控制联网标准下的一个公开标准, 该协议可以自由地提供给任何人, 可以从 <http://global.his.com/要求IEC60730-1的一份复制件>。LonTalk 协议符合 ISO/OSI-RM 的 7 层协议模型, 任何符合 LonTalk 协议的产品都能实现互操作。

(2) 支持多种网络拓扑和传输介质。LonWorks 支持多种网络拓扑传输结构, 支持总线型、星型、环型和混合型等拓扑结构; 支持多种传输介质, 如双绞线、电力线、无线电波、红外线、光纤和同轴电缆等。这样, 用户可以根据不同的现场环境选择不同的收发器和介质。采用双绞线通信支持 64 节点/每段, 速率为 78kbit/s 时 2700m (总线型, 双终端器)、1.25Mbit/s 时 130m 范围内 (总线型, 双终端器)、78kbit/s 时 500m (自由拓扑结构, 无终端器)。

(3) Neuron 芯片。Neuron 芯片是 LonWorks 技术的核心, 包含了 ISO/OSI 模型 7 层协议中除应用层之外的 6 层协议, 所以用户只需要进行应用层编程和配置, 就可以完成 LonWorks 设备的开发。这就使 LonTalk 协议的实施标准化, 开发和配置较为容易, 确保了节点间使用可靠的通信标准进行互操作。Neuron 芯片内部包含 3 个 8 位的 CPU (介

质访问处理器、网络处理器、应用处理器)，它既能管理通信，同时具有输入、输出以及控制功能。Neuron 芯片可以通过 5 个通信管脚与网络上的其他节点交换信息，也可以通过 11 个应用管脚与现场的传感器和执行器交换信息。这 11 个应用管脚具有 34 种应用操作模式，可以在不同的配置下为外部提供灵活的接口和芯片内部的计时器应用。

(4) 网络通信采用面向对象的设计方法。LonWorks 网络技术通过“网络变量”交换数据，它使网络通信的设计简化成为参数设置，通过网络变量实现网络节点间的连接。当一个网络变量在一个节点的应用程序中被赋值后，LonTalk 协议将网络变量新值构造成为隐式消息，透明地传递到其他节点。LonTalk 报文由 Neuron 固件自动生成、发送和接收，应用程序不必涉及这些问题。网络变量通过提供给节点相互间明确的网络接口，极大地提高了节点产品的互操作性。

此外，由于网络变量的长度有限，最多 31 字节，又提供了四种类型的报文服务：应答方式、请求/响应方式、非应答重发方式、非应答方式。

(5) 提供了完整的开发工具平台。Echelon 公司为 LonWorks 网络的开发提供了一套完整的、强有力的开发工具，包括编译工具 Nodebuilder、网络配置工具 LonMaker、网络操作系统 LNS (LonWorks Networks System) 等。

可见，LonWorks 网络完全满足实时性要求不是很高的测控网络，符合世界技术发展潮流，现已成为众多现场总线中的佼佼者。

LonWorks 网络对设备的描述是其主要特色之一。任何一个 LonWorks 设备都可以用由一定数量的网络变量和配置属性按照一定行业规范组成的功能块进行表示。标准类型的网络变量和配置属性能使不同制造商的产品通过建立标准的数据传送模式、正确地翻译、传送数据，从而保证了不同厂商设备之间的互操作性。此外，用户还可以根据自身需要定制网络变量类型，从而保证了设备开发的灵活性。

LonWorks 是由美国 Echelon 公司提出的一种通用的测控网络，应用范围广。其核心 Neuron 芯片，具有管理通信、输入输出及控制功能；Neuron 芯片中的固件能实现 LonTalk 协议和所有任务调度。Echelon 公司还为网络的开发提供强有力的开发工具和模板。这使得 LonWorks 设备的研发变得十分简单，极大地缩短了开发周期。但这也使得 LonWorks 设备的开发依赖于 Echelon 公司，导致较高的开发成本，缺乏自主核心技术。

2.2.6 工业以太网介绍

2.2.6.1 工业以太网含义及特征

在工业控制领域，工业自动化系统正向分布式、智能化的实时控制方向发展，用户对更高速度、更多信息的追求和统一的通信协议和网络的要求日益迫切；同时用户要求企业从现场控制层到管理层能够实现全面的无缝的信息集成，并提供一个开放的构架，这些都要求控制网络使用开放的、透明的通信协议。但是目前的各种现场总线都无法满足这些要求，而在以太网上广泛使用的 TCP/IP 协议族的开放性使得在工控领域中的通信问题得到较好的解决。因而，近年来以太网逐渐进入了控制领域，形成新型的基于以太网的控制网络技术，即“工业以太网”。

工业以太网通信技术虽然来源于 IT 信息技术的计算机网络技术，但是又有自身一些特点。工业以太网在用于测量和控制等场合的数据通信时，要求对事件能实时响应；要求数据高度完整；在有电磁干扰及条件比较恶劣的工作环境中，要求仍然可以正常通信。按照国际电工委员会的定义，

工业以太网是用于工业自动化环境，符合 IEEE 802.3 标准，按照 IEEE802.1D“媒体访问控制 (MAC) 网桥”规范和 IEEE802.1Q“局域网虚拟网桥”规范的以太网。简单地说，工业以太网有以下一些优点：

(1) 具有以太网的众多优点，如：高速、开放、应用广泛、技术成熟。

(2) 可以将工厂的商务网、车间的制造网络和现场级的仪表、设备网络集成。

(3) 结合 WEB 功能，使工厂的电子商务、物资供应链和 ERP 等形成统一的整体。

(4) 可以使用双绞线、同轴电缆和光纤等不同的物理介质构成不同的拓扑结构。

目前国际上使用比较广泛的工业以太网有下列几种：

EtherNet/IP、Modbus TCP、Profinet、EtherNet PowerLink、EtherCAT、SERCOS、EPA 等。这些工业以太网解决方案都是建立在 IEEE802.3 标准基础上，通过对其和相关现场总线标准的实时扩展后，做到与标准以太网无缝连接。其中 EPA 是由我国自行开发的一种工业以太网解决方案。

2.2.6.2 EtherNet/IP 工业以太网介绍

相对于其他类型工业以太网而言，EtherNet/IP 使用标准 TCP/IP 以太网，EtherNet/IP 的性能会随着以太网其他技术（如信息安全技术、高速传输技术、高速交换技术等）的不断发展而水涨船高。而其他几种工业以太网技术，在具体实现时或者在实时性能要求高的应用场合必须有专用的 ASIC 芯片支持，或者对标准 ISO 七层模型的数据链路层进行改造后使其满足通信需要。这些解决方案虽然可以满足不同应用场合的需要，但是协议兼容性和开放性较 EtherNet/IP 稍差一些。

EtherNet/IP 技术是 CIP 技术与以太网技术的巧妙结合，它基于标准的 TCP/IP 协议，只是在 TCP 报文的数据部分嵌入了 CIP 封装协议（见图 2.15-10），封装协议的主要任务是定义和规范了如何封装和传输上层协议报文，以及如何管理和利用下层 TCP/IP 连接，起到承上启下的作用，功能上与 ISO 七层模型中的数据链路层非常类似。实现工业以太网的方式有很多，EtherNet/IP 选择基于完全标准的 TCP/IP 以太网，而不是部分基于以太网或基于修改过的以太网，不对 TCP/IP 协议栈作任何改动，与其他基于标准 TCP/IP 以太网的 IT 标准完全兼容。

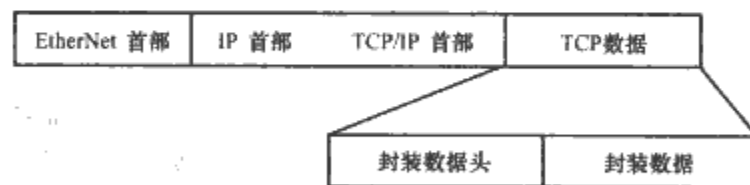


图 2.15-10 基于标准 TCP/IP 协议的 EtherNet/IP 数据封装格式

标准 TCP/IP 以太网技术的完全开放，意味着 EtherNet/IP 产品供应商可以自由、自主地选择全球范围内任何符合工业等级要求的 TCP/IP 以太网控制芯片进行开发和生产。在商业以太网的硬件和软件基础上运行适用于工业自动化设备的应用层协议，使得如商业以太网的交换机等设备就可以直接用在工业控制系统中（当然需要满足实际系统的控制和环境等条件要求）。这样一来，在 EtherNet/IP 产品的开发和制造中，中国自动控制厂商和全球范围内其他厂商站在了同一条起跑线上。

2.2.6.3 CIP 介绍

EtherNet/IP 在商业以太网中引入了 CIP (Common

Industrial Protocol, 通用工业协议)。CIP 是专为工业控制设计的应用层协议, 提供了访问数据和控制设备操作的对象集合。在发送 CIP 数据包以前必须对其进行封装。EtherNet/IP 和 CIP 的协议架构如图 2.15-5 所示。

CIP 是经实践证明的、实时性能很好的应用层协议, 它为 DeviceNet、ControlNet、EtherNet/IP 网络提供公共的应用层和设备描述。CIP 建立在单一的、与介质无关的平台上, 为从工业现场到企业管理层提供无缝通信, 使用户可以整合跨越不同网络的有关安全、控制、同步、运动、报文和组态等方面的信息。它有助于使工程化和现场安装的开销最小化, 使用户获得最大的投资收益。

CIP 采用基于非连接的用户数据报文协议/网际协议 (UDP/IP) 和基于连接的传输控制协议/网际协议 (TCP/IP) 作为以太网上控制和信息的传输协议, 允许发送显式和隐式报文, CIP 与 TCP/IP 层次关系见图 2.15-11。其中, 隐式报文是对时间有苛刻要求的控制信息, 通过 UDP/IP 完成; 显式报文是对时间无苛刻要求的点对点信息, 可由 TCP/IP 完成。显式报文用于配置上、下载和故障诊断; 隐式报文用于实时 I/O 数据的传输。CIP 是一个基于对象的网络设备的解决方案。作为设备间进行自动化数据传输的通信协议, CIP 把每一个网络设备看作一系列对象的集合。每个对象也只是一组设备相关数据的集合, 称为属性。它通过设备描述对网络中的设备进行完整的定义。CIP 向终端用户提供了自动化系统必不可少的控制、组态、数据采集服务功能。为面向自动化领域提供了以太网上的工业自动化设备的互操作性和互换性。

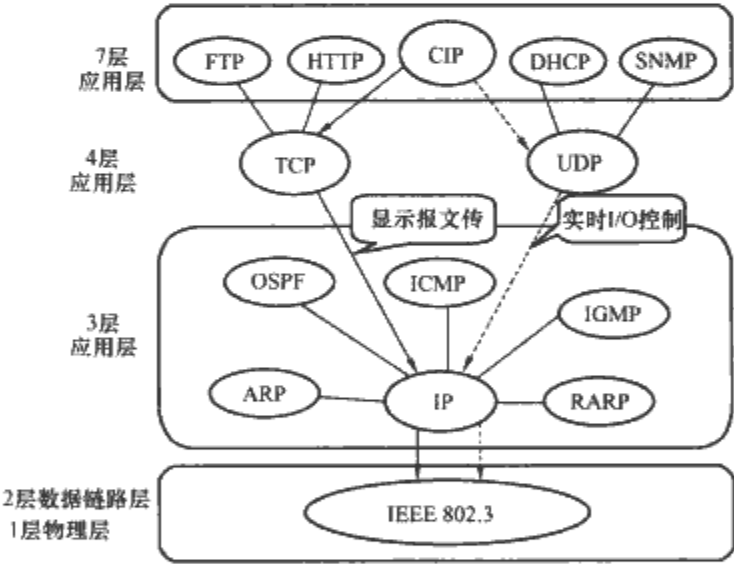


图 2.15-11 CIP 与 TCP/IP 层次关系

EtherNet/IP 规范中使用 0x08ae 作为 UDP 端口号; 使用 0xaf12 作为 TCP 端口号, 并通过国际组织的审议, 所有 EtherNet/IP 产品都应该通过这两个端口进行网络数据的传输。

(1) CIP 对象模型。所有 EtherNet/IP 设备都必须实现的核心对象: Message Router (报文路由器)、Unconnected Message Manager (无连接报文管理器)、Identity Object (标识对象) 和 Connection Manager (连接管理器); 可以选择实现的对象: Assembly Object (组合对象)。

1) Message Router 根据要访问的类和属性, 进行对目的对象的路由。

2) Unconnected Message Manager 提供跨网络的报文服务, 并可以进行报文复制检测和重试服务。

3) Identity Object 包含了当产品接入网络时, 与网络相关的所有服务。

4) Connection Manager 负责管理网络上连接的打开和

关闭状态, 为 1 类和 3 类连接提供传输目标。

5) Assembly Object 用于实现网络上结点数据的传送和接收。

CIP 规约定义了三种类型的对象: 必须对象、应用对象、厂商定义对象。

1) 必须对象是指每个 CIP 设备都必须包含的对象, 如 Identity (标识对象)、Message Router (报文路由器对象) 和 Network (网络对象) 等。Identity 对象包含一些设备的属性, 如厂商标志符、出厂日期、设备序列号等数据。Message Router 对象用于对设备中对象间的显式请求报文进行路由。Network 对象包含了与对象的物理连接有关的一些数据。比如在 DeviceNet 网络上, CIP 设备的网络对象包含了 MacID (硬件地址) 等与 DeviceNet 网络有关的接口信息数据; 对于 EIP 设备而言, 网络对象则包含了 IP 地址等描述设备与以太网的接口信息数据。

2) 应用对象定义了设备封装的数据。这类对象对应于不同的设备。比如, 驱动系统中的电动机对象包含了描述频率、额定电流和电动机尺寸等属性数据; I/O 设备的模拟量输入对象包含了模拟输入的类型和电流值等属性数据。

3) 厂商定义对象是指那些在规约中没有指明的而是由厂商自己构造的特殊对象, 在访问这类对象时可以使用与访问必须对象和应用对象相同的方法。

为了推广 EtherNet/IP 作为工业自动化应用层协议的使用, 国际上有四个独立的组织一直在努力工作, 即: ODVA (Open DeviceNet Vendor Association)、CI (ControlNet International)、IAONA (Industrial Automation Open Network Alliance) 和 IEA (Industrial EtherNet Association)。这些组织进行 EIP 的技术开发和管理工作。

(2) 低压电器设备到工业以太网的接入。过去以太网没有进入工控领域, 主要是由于以太网采用的 CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection, 带冲突检测的载波监听多点访问) 是一种非确定性或随机性通信方式, 不能满足实时性和确定性要求很高的工业控制场所使用需求。但是随着以太网技术的不断发展, 其网络传输速度不断提高, 带宽达千兆的网络已经出现; 而且高速交换技术也使得以太网的确定性得到极大地提高, 在克服了过去种种不足后, 以太网进入工业领域自然水到渠成。

目前世界上应用广泛的工业以太网技术解决方案都是在原有现场总线的基础上发展而来的, 如 ProfiNet 是 Profibus 协议在工业以太网上的应用; EtherNet/IP 是 CIP 协议在工业以太网上的应用; Modbus TCP 是 Modbus 在工业以太网上的应用。由于它们在与标准以太网兼容的同时又保留了原有现场总线协议的许多特点, 所以把支持各种现场总线协议的低压设备接入到工业以太网时, 只需对原有的接入设备进行相应的升级, 使其具有以太网网络接口, 而在应用层的协议上并不需要太多变化。

例如 EtherNet/IP 产品可以与任何一个基于 CIP 的网络 (如 DeviceNet 和 ControlNet) 共存。由于建立在广泛使用的协议簇之上, 所以 EtherNet/IP 首次实现了传感器级网络到控制器和企业级网络的无缝集成。

2.3 低压电器的通信数据

每种设备应当定义与外界交换的数据, 现以框架断路器为例列出表 2.15-5~表 2.15-11, 其他设备的数据表结构类似。

表 2.15-6 工 作 状 态

Byte	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0
低字节	保留			储能： 1=已储能 0=未完成储能	合闸就绪： 1=就绪 0=未就绪	分合状态： 0=分 1=合	断路器位置： 0=脱离位置 1=连接位置 2=试验位置 3=保留	
高字节	保留			测试标志： 1=在测试状态 0=不在测试状态	本地进行参数修改： 1=已修改 0=未修改	允许网络控制： 1=允许 0=不允许	报警信号： 1=有报警信号 0=无报警信号	故障标志： 1=存在故障 0=不存在

表 2.15-7 报 警 状 态

Byte	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0
低字节	温度超值： 1=超值 0=未超	负载监控值 1 超值： 1=超过 0=未超	负载监控值 2 超值： 1=超过 0=未超	长延时动作 电流超值： 1=超过 0=未超	短延时动作 电流超值： 1=超过 0=未超	接地电流动 作电流超值： 1=超过 0=未超	N 相动作电 流超值： 1=超过 0=未超	剩余电流动 作超值： 1=超过 0=未超
高字节	存储器 状态： 1=出错 0=正常	保留	保留	保留	保留	保留	保留	保留

表 2.15-8 故 障 动 作 状 态

Byte	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0
低字节	欠压脱扣： 1=动作 0=未动作	不平衡动作： 1=动作 0=未动作	瞬时动作： 1=动作 0=未动作	长延时动作： 1=动作 0=未动作	短延时动作： 1=动作 0=未动作	接 地 电 流 动作： 1=动作 0=未动作	N 相 电 流 动作： 1=动作 0=未动作	剩 余 电 流 动作： 1=动作 0=未动作
高字节	保留	保留	保留	保留	保留	保留	保留	保留

表 2.15-9 保 护 设 定 选 择

Byte	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0
低字节	保留	保留	热模拟功能： 1=ON 0=OFF	瞬 时 保 护 选择： 1=ON 0=OFF	短延时保护 选择： 1=ON 0=OFF	短延时定时 限/反时限： 1=反时限 0=定时限	接 地 保 护 选择： 1=ON 0=OFF	负 载 监 控 方式： 0=方式 1 1=方式 2
高字节	保留	保留	保留	保留	保留	保留	保留	保留

表 2.15-10 断 路 器 保 护 特 性

00H	三段保护曲线可调	02H	不可调保护继电器特性	04H	不可调电动机保护特性
01H	不可调熔断器特性	03H	不可调配电线路保护特性	05H~0FH	保留

表 2.15-11 控 制 命 令

Byte	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0
低字节	保留	保留	断路器储能： 1=储能 0=不动作	保留	保留	电流脱扣应 答并复位： 1=应答并 复位 0=正常	断路器分合闸： 0=不动作 1=分闸 2=合闸 3=保留	
高字节	保留	保留	保留	保留	保留	保留	保留	保留

对表 2.15-6~表 2.15-11 的说明:

- (1) 最大额定工作电压和最小额定工作电压:是指断路器最大额定工作电压和最小额定工作电压。
- (2) 断路器地址是指在通信组网时断路器的唯一编号。
- (3) 位置调整是为了方便上位机的编程。
- (4) 新加的内容是满足现有的产品需要。
- (5) 合闸特性由热模拟功能代替。

2.4 将低压电器设备接入网络

2.4.1 系统概述

现代工业技术的发展对低压配电系统运行的可靠性及其智能化管理提出了更高的要求,而微处理器技术的广泛应用及计算机系统可靠性的大幅度提高,使智能化低压电器元件得到快速发展,智能化低压电器管理系统应运而生。作为直接面向终端用户的低压电器,是用于交流电压至 1000V,直流电压至 1500V 的电路中起通断、控制或保护等作用的电器,低压电器是电器工业的重要组成部分。

2.4.2 低压电器通信的发展现状

随着新技术的发展,特别是电子、微电子技术和计算机的迅速发展,将对低压电器元件带来深远的影响,在原有产品继续完善性能、功能、提高质量的同时,随着现场总线技术的成熟和其技术优势,使得低压电器向可通信智能化方向发展。由于国内企业技术力量相对较弱,重复开发每一种总线技术的投入都很大。

但是国内现有的可通信的低压电器产品,大多能提供串行接口或 Modbus 总线接口。原因有:

- (1) Modbus 协议相对简单,开发门槛低,实现比较容易。
- (2) 其他的现场总线技术协议比较完善,开发门槛较高,开发投入的技术力量较大。
- (3) 其他的现场总线技术进入国内较晚,研发力度不够。

2.4.3 低压电器接入系统的方案

面对这种局面,将低压电器接入到现场总线系统,有如下方案:

- (1) 通过添加协议转换接口,实现系统的集成。根据国内目前的情况,有很多公司开发了协议转换接口—适配器。该接口具有两种协议转换的功能,所以系统集成商可以利用各种总线的通信适配器将低压电器接入到总线系统中。通过适配器接入系统方案见图 2.15-12。

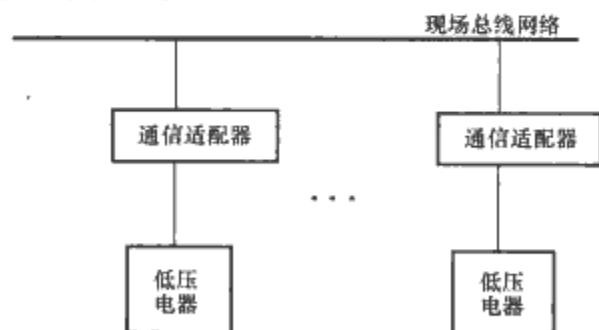


图 2.15-12 通过适配器接入系统方案

图 2.15-12 所示的接入系统的方案是通过外置通信适配器的方式,该方案具有的优点:系统集成灵活,可以很方便地实现现场总线网络;通过外置适配器的方式,安装到低压电器旁边,作为一个专用的通信模块,对低压电器产生的影响较小。但也存在一些缺点,比如需要安装空间等。目前,大多国内的产品都是采用外加通信适配器连接到总线系统中的,这是实现自身设备接入总线系统最快捷、最经济的方案。不用改变设备的本体结构,花很少的时间和成本就能接

入总线网络,是系统集成的快捷方便的方法。

(2) 将总线通信接口通过 OEM 方式嵌入到低压电器设备中。目前,OEM(由其他原始设备制造商提供部件)方式是比较流行的,也是一个发展方向。分析国外大公司的低压电器,他们在低压电器的通信接口问题上多数采用 OEM 插卡方式来实现,利用模块化设计思路,对产品的开发带来很高的效率。利用该方案,可以使得设备通过一个内置的板卡接入总线网络系统,如图 2.15-13 所示。利用该方式接入到系统中,该低压电器需要有足够的空间来放置通信接口板卡。这个方案的优点:产品集成度高,功能强大;目前比较流行的现场总线种类比较多,而且各有优缺点,利用插卡的通信方式,可以使得产品面向范围广。

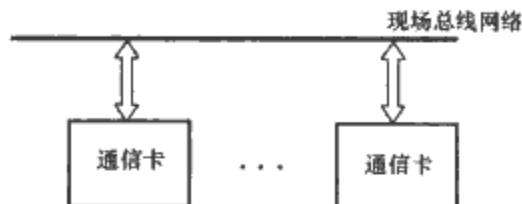


图 2.15-13 内置通信卡接入系统

(3) 将通信接口完全嵌入到主控制器中。该方案也有些公司正在用,提供的通信总线比较单一,就面向于某一总线技术。

通过以上三种方式都可以使低压电器接入到现场总线系统中,每一种方案都有其应用的优缺点,应根据实际需要来分析该如何实现低压电器接入到现场总线网络更有利。

3 基于现场总线的低压配电和控制系统

国际上现流行的配电管理系统和配电自动化主要是针对中低压系统而言的,日本从 20 世纪 80 年代到现在已完成了计算机系统与配电设备配合的配电自动化系统,韩国、台湾地区于 20 世纪 90 年代也完成了局部配电系统的馈线自动化,并建立了自己的配网自动化实验网络。配电技术的现代化是建立在一定的工业基础之上的,是社会技术经济发展到一定程度后的产物。欧美和日本等发达工业国家曾下大力气推广该技术,然而在我国这一技术才刚刚起步,近几年,一些地区发生电网事故,导致重要用户停电,除了某些人为的因素以外,电网结构薄弱、可靠性低,是其主要原因,自动化程度低、管理不善也是重要原因之一。因此,对配电系统设备的改造和实现配电自动化已成为亟待解决的问题。

3.1 基于现场总线的低压配电与控制系统概述

传统的低压配电系统,主要通过电工仪表(电流表、电压表、功率表、电能表等)、配电和控制电器(断路器、接触器、继电器等)实现配电、控制、保护、监视等功能。这种方式需要配备有多种模拟指针式仪表和控制电器,并以人工现场操作为主,覆盖范围有限且无法实现电力供应的智能化集中管理。随着现代工业和新技术的发展,电力仪表和设备的数字化技术日臻成熟,一些发达国家已经成功地将数字智能化技术应用于低压成套设备上。这就是将电力设备的电力计量、监测、保护、控制同微电子技术、计算机技术、网络通信技术相结合,实现现代电力工业自动化,这已经成为一种必然趋势。

智能网络配电系统就是将由各种带通信功能的配电设备与计算机组成监控系统组合应用,一般由若干面分面布置的通过通信网络连接的可通信低压成套柜组成。其配置可根据具体工程的需要,既可配置成完全由可通信器件及监控装置组成的成套柜,又可配置成全部使用传统电器元件及监控装

置的成套柜，同时也能混合配置。给用户选用提供了较大的灵活性，以满足不同层次的需要。

全分布式的智能配电电能监测与控制是以一次主设备如断路器、变压器、母线等为安装单位，将控制、I/O、闭锁、保护等单元分散，就地安装在一次主设备附近。站控单元通过通信口与各一次设备相连，并与管理机和远方调度中心通信。它有如下特点：

- (1) 简化了配电二次部分的配置，大大缩小了控制室的面积。
- (2) 减少了施工和设备安装工程量。
- (3) 简化了配电电能监测与控制系统二次设备之间的互连线，节省了大量连接电缆。
- (4) 全分布式结构可靠性高，组态灵活，检修方便，且抗干扰能力强。

3.2 现场总线技术在低压配电系统中的应用

3.2.1 配电系统数据传输的要求

20 世纪末，集自动化技术、嵌入式技术和网络通信技术于一体的现场总线电器包括智能开关设备和控制设备，在国外得到高速发展，国际上出现多种现场总线系统，并迅速成为世界范围自动化技术发展的热点。各大公司纷纷推出采用现场总线技术的智能化配电网的监控、保护与信息网络系统。

目前配电自动化系统中使用的传输规约种类较多，各个公司的产品使用的标准尚不统一，系统互联和互操作性差，由于数据通信在配电站自动化系统内的重要性，经济、可靠的数据通信成为系统的技术核心，而由于配电站的特殊环境和自动化系统的要求，配电自动化系统内的数据网络应满足下列要求：

- (1) 快速的实时响应能力。
- (2) 很高的可靠性。
- (3) 优良的电磁兼容性能。
- (4) 分层式结构。

电力配电系统信息传输的主要特点是要求传输应有轻重缓急之分，并且分散的设备之间应能实现时间同步。由于网络技术的迅猛发展，通过网络交换数据的速度迅速提高，传送机制更加灵活。随着电力市场的兴起和电力系统的扩大，信息量越来越大，要求在各种自动化系统内快速、准确地集成、合并和传播从发电厂到用户接口的实时信息。对于通信网络，采用优先级控制可满足不同性质信息的要求。在实时性方面往往用提高网络传输速率来解决。数据通信网是构成变电站自动化系统

的关键环节，通信网络的标准化是使变电站自动化迈向标准化的难点之一，受性能、价格、硬件、软件、用户策略等诸多因素的影响，目前在选择“接口网络”上很难达成一致。

但当前各工业网络组织趋于一致的基于以太网的工业以太网方案，有可能逐步解决目前多种现场总线互不兼容的现状。EtherNet/IP 是基于通用以太网技术的工业网络，它能为工业应用提供完整的解决方案，它的新技术体现在同步技术（CIP Sync）、运动控制（CIP-Motion）和功能安全（CIP Safety）方面的进展。结合 CIP Sync（基于 IEEE-1588）技术的 EtherNet/IP 已经实现的时间同步精度高达 100ns；CIP Safety 支持在同一网络或线路上同时运行标准设备和安全设备的能力，并能够无缝地进行系统集成。

工业以太网作为一种新型的现场总线，以其为核心的测控技术也是大型信息测控领域中的一个重要发展方向。

3.2.2 基于总线网络的低压配电与控制系统

基于总线网络的智能配电系统就是将配电系统中带通信功能的智能电器与计算机监控软件通过网络技术互联起来，实现信息交换。智能网络低压配电与控制系统打破了传统控制系统采用的按控制要求，设备一对一的分别进行连线的结构形式。把原先 DCS 系统中处于控制室的控制模块、各输入输出模块放入现场设备，现场设备具有独立的控制和通信能力，因而能够不依靠控制室中的计算机或控制仪表，直接在现场实现控制，即彻底的分散控制。因此，其在技术上具有很多优势。

由于现场总线结构简化，不再需要 DCS 系统的信号调理、转换隔离等功能单元及其复杂的接线，节省了硬件数量和投资。简单的连线设计，节省了安装费用。设备具有自诊断与简单故障处理能力，减少了维护工作量。设备的互换性、智能化、数字化提高了系统的准确性和可靠性。还具有设计简单，易于重构等优点。

上海电器科学研究所（集团）有限公司推出的 3S-Net 系统，是典型的以现场总线技术为基础的智能网络配电与控制系统。采用通过以太网连接的多台上位机、工控机和备用机可随时切换；多台 PC 机通过以太网连接；为保证系统的实时性采用 UDP/IP、TCP/IP 协议，主机一旦崩溃，备用机自动切换接替工作。系统可以兼容 DeviceNet、Modbus、Profibus 等多种现场总线。实现中压设备与低压系统的“软连接”。

该系统通信结构分为三层，分别为设备层、现场控制层和管理层，如图 2.15-14 所示。

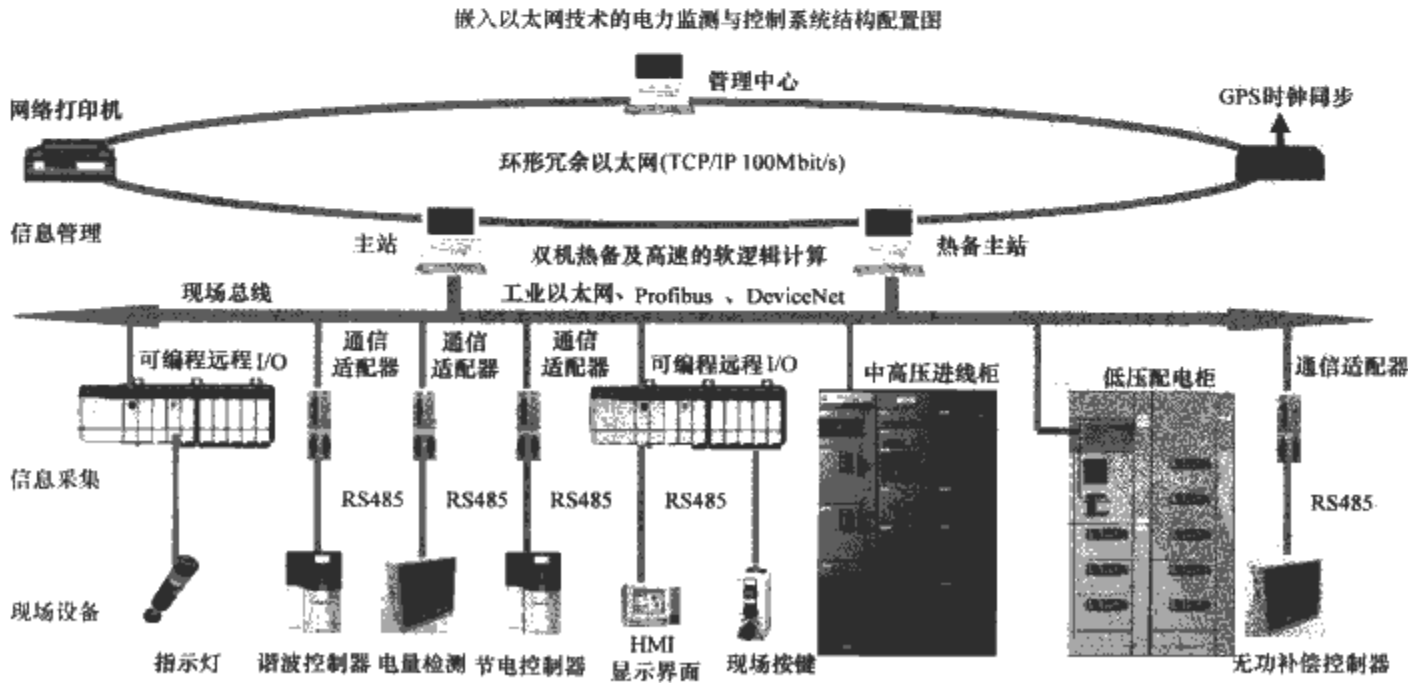


图 2.15-14 3S-Net 系统通信结构

(1) 设备层。底层设备层采用 DeviceNet、Profibus、Modbus 等总线，接入的设备有框架断路器、塑壳断路器、电能表、I/O 模块、无功补偿控制器等。

设备层可采用多种标准 DeviceNet (Profibus、Modbus) 总线协议，可以设置多个主站分别连接不同的总线协议。

(2) 信息层。采用标准 TCP/IP 以太网协议实现系统控制器上级管理器之间的通信 (通信速率为 100Mbit/s)。

3S-Net 系统是面向智能网络配电和工厂自动化的新一代开放式系统，全面支持现场总线技术，系统采用全局数据库技术，实现全局一体化编程。系统主站与上级通信为标准以太网，系统结构具有较强伸缩能力，系统编程采用国际标准。现场控制设备采用符合总线技术要求的可通信智能设备，通过通信适配器与控制站进行数据通信。

3.2.3 上位机的系统配置

3.2.3.1 SEARI-KingView 组态软件

SEARI-KingView 组态软件多总线版本是上海电器科学研究所 (集团) 有限公司，针对 Profibus、DeviceNet 总线的特点开发的一套专用组态软件。它结合了传统组态软件和 Profibus、DeviceNet 总线的优点，添加了许多人性化的设计，大大降低了系统组态的劳动强度，避免了因庞大的数据定义而引起的失误，解决了运行过程中传统 I/O 数据与显式信息 (非周期性数据) 传输的矛盾。

SEARI-KingView 组态软件的特点：

(1) 模板化。模板化的设计方法是一种面向对象的方法。这种方法将每个设备类型作为包含若干个数据点的“结构体”，在添加具体设备时将该“结构体”内的数据点通过程序转化为组态软件内的数据点。这样就可以做到以设备为单位来组态，自动生成每个设备的数据点。

以一个 DeviceNet 网络为例，接入 30 个 MCCB 开关。

设每个 MCCB 有 10 个 Input 点，1 个 Output 点，20 个非周期性数据。

传统组态方法： $(10+1+20) \times 30 = 930$ 个左右的数据点设置

模板化：约 31 点 MCCB 设备类型与 30 个设备设置，由于低压电器都是标准的设备，一旦生成这种设备类型就可重复调用，因此模板化配置是非常简单。可以看出这种方法可以大大减少工作时间，降低错误发生的概率。

(2) 与工业总线的无缝结合。本软件通过对 EDS、GSD 等标准设备描述文件的导入，可以实现与 DeviceNet、Profibus、DP 等总线的无缝结合。

EDS 与 GSD 文件中包含了设备的接口信息，比如输入有几个字节等。通过导入 EDS 和 GSD 文件，再对数据点进行详细设置，就可以形成本软件的“设备类型描述文件”。该文件中包含了详细的数据点定义、访问路径、表示方式等信息。软件的系统框架见图 2.15-15。

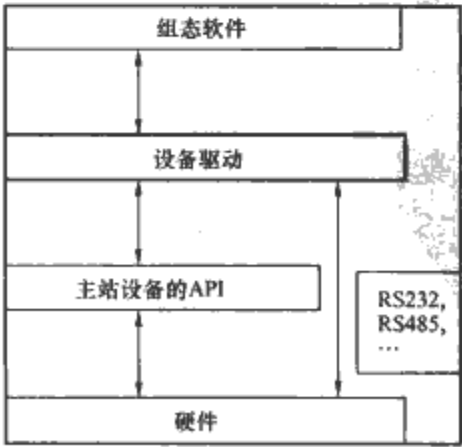


图 2.15-15 软件的系统框架

1) 组态软件。完成系统的组态、人机界面、数据记录工作。

2) 设备驱动。是组态软件与硬件沟通的桥梁，它负责采集硬件的数据并传递给组态软件。

3) 与硬件通信。当硬件是现场总线主站设备时，我们通过主站设备提供的 API (应用程序接口) 来访问硬件；当硬件只是某种链路 (如 RS232) 时，直接在驱动中编程实现即可。

3.2.3.2 主站设备

主站是现场总线通信的一个重要环节，DeviceNet、Profibus-DP、Modbus 总线一般都采用主/从通信，并且一个总线子网一般设置一个主站和多个从站，主站是这个子网的核心。承担总线的管理功能，包括通信的配置，组织本网络的通信，扫描所有从站和对外的通信或数据交换，通过主站的管理使现场设备只需实现相对简单的从站功能，这可简化现场设备通信接口的实现，降低设备投资。主站也是本总线对外的连接点，上位机或外部网络通过主站实现与本总线所有从站的数据交换。

主站有多种实现方式，目前的产品主要有 PLC 主站功能模块、独立的代理服务器和 PC 机内的 PCI 总线主站卡三种。PLC 主站功能模块是 PLC 的单元，设置这种主站主要为 PLC 传送控制数据，功能较简单，如果不需要 PLC 控制一般不采用这种方式；代理服务器是近年出现的产品，它是通过网络连接独立运行的产品，一端是作为总线主站连接从站设备，另一端是高速的工业以太网端口连接上层网络或上位机，实现不同总线的连接，用这类产品配置系统可使系统更加灵活；第三种是目前常用的 PCI 总线主站卡，是 PC 机内的功能卡，它是在 PC 机支持下运行，与 PC 机紧密连接的部件，与上位机交换数据最快捷、成本最低，因此应用最广。以下重点介绍 PCI 卡形式的主站。

PCI 主站卡是标准产品，来自不同的供货商的产品虽然功能有所差异，但都能符合基本的协议，在上位机安装主站卡和将从站接入主站都只需要“配置”，通过配置设定相关的参数，通过配置设置的参数就能协同工作。

目前国内市场占有率较高的主流总线是 Profibus、DeviceNet，以它们为例，以下给出 PCI 主站卡和从站设备在 SEARI-KingView 组态软件支持下的配置过程。

(1) 添加主站设备。插入主站卡运行组态软件，新建工程，在工程浏览器中点中工程浏览器的设备项，在右方窗口中双击“新建...”如图 2.15-16 所示。



图 2.15-16 工程浏览器

鼠标点击后，弹出“设备配置向导——生产厂家、设备名称、通信方式”对话框，如图 2.15-17 所示。



图 2.15-17 设备配置向导

在上面的对话框中选择自己要添加的设备。我们以 DeviceNet 主站为例。点击“DeviceNet 主卡”左边的“+”后，首先会弹出一些 DeviceNet 主卡的生产厂家，然后是这些生产厂家的具体设备，如选择“DeviceNet 主卡-上海电科所-DeviceNet 主卡 5136DN-DeviceNet 主卡”，在对话框的下面会显示所选设备的详细信息。

选择完后，在对话框的“下一步”按钮亮起，点击该按钮，弹出“设备配置向导——逻辑名称”对话框，如图 2.15-18 所示。



图 2.15-18 “逻辑名称”对话框

在输入框中输入所要安装设备的逻辑名称，在逻辑名称向导页中为 DeviceNet 主卡指定一个设备名称。主卡名由字母和数字组成，可以是汉字，长度不超过 32 字节。这个逻辑名称在网络中必须是唯一的，如果跟其他设备名称重复，单击“下一步”按钮后，则会弹出一错误对话框，如图 2.15-19 所示。



图 2.15-19 错误对话框

提醒你该名称的设备已经存在，确定后，可以重新输入一新的逻辑名称，如“SSTDVN”。逻辑名称定义好后，单击“下一步”按钮，打开“设备配置向导——设备地址设置指南”对话框，如图 2.15-20 所示。

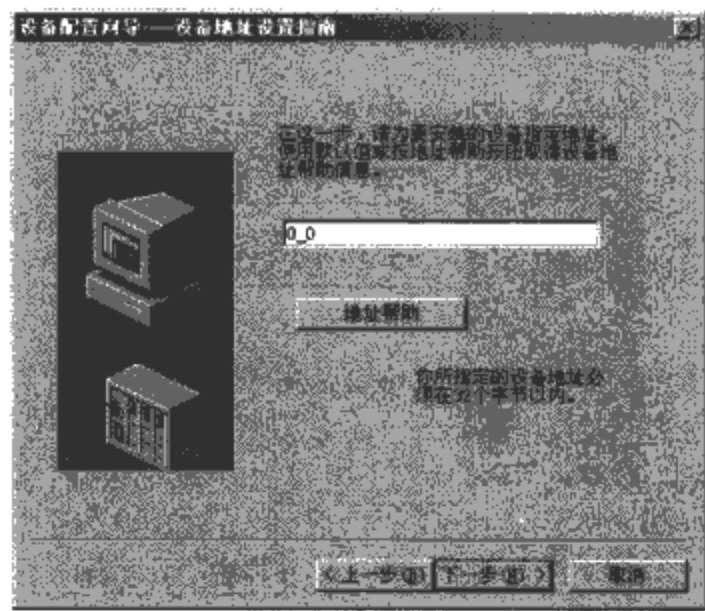


图 2.15-20 “设备地址设置指南”对话框

在输入框中输入主站设备地址，地址格式为：主卡索引（数字）_地址（数字）。

1) 主卡索引为计算机安装的主卡编号，从 0 开始，如果系统只安装了一块 DeviceNet 主卡，则主卡索引就是 0，如果系统再安装一块主卡，则新的主卡索引就是 1。主卡索引可以到 SST 主站卡本身提供的管理工具“Direct-Link Configuration”中查询。

该工具通过“开始→程序→SST DeviceNet→Direct-Link Configuration”即可执行，如图 2.15-21 所示。



图 2.15-21 PCI 主站卡索引

进入程序后可以看到图 2.15-22 所示界面。

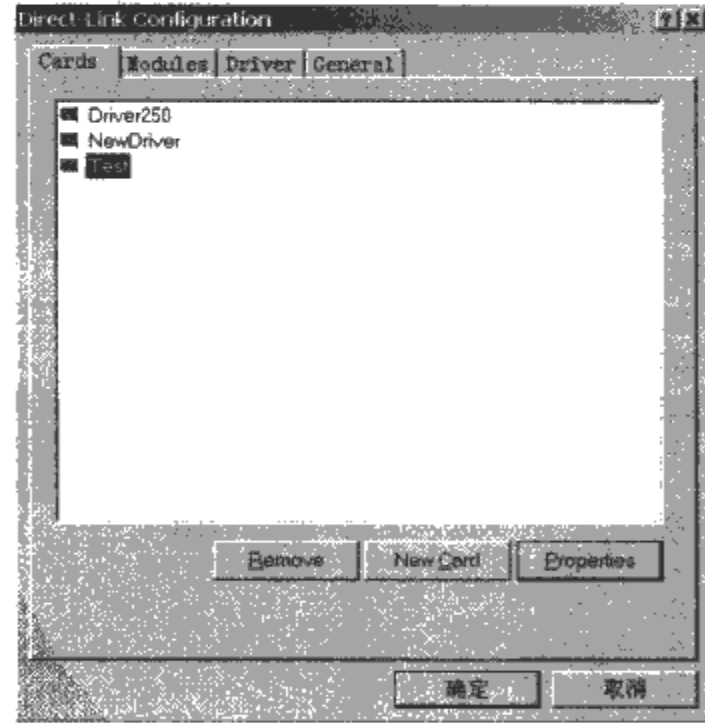


图 2.15-22 直接链路配置

这里配置有三块主卡：Driver250 的索引为 0，New-Driver 的索引为 1，Test 的索引为 2，以此类推。

2) 地址是指主卡作为 DeviceNet 主站的地址编号，根据主卡配置而定，一般为 0。

地址设置完后，单击“下一步”按钮，打开“通信参数”对话框，如图 2.15-23 所示。

“通信参数”向导页配置当通信出现故障时的尝试恢复间隔、最长恢复时间及是否使用动态优化。单击“下一步”按钮，打开“设备安装向导——信息总结”对话框，如图 2.15-24 所示。

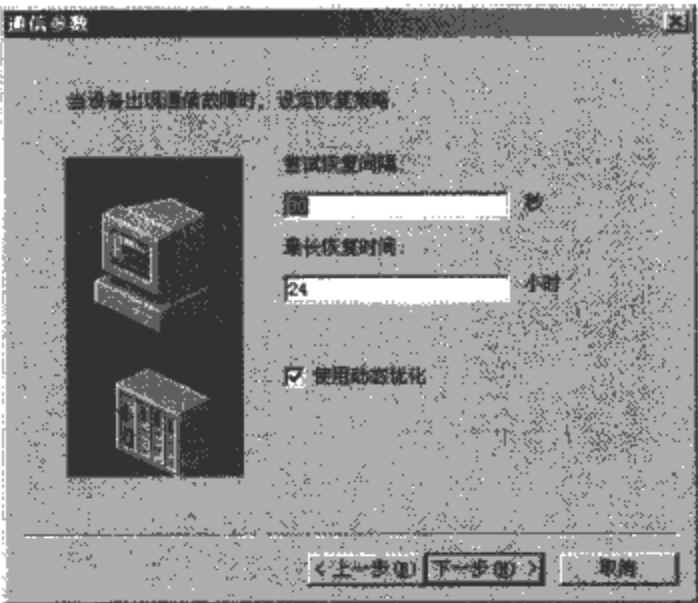


图 2.15-23 “通信参数”对话框

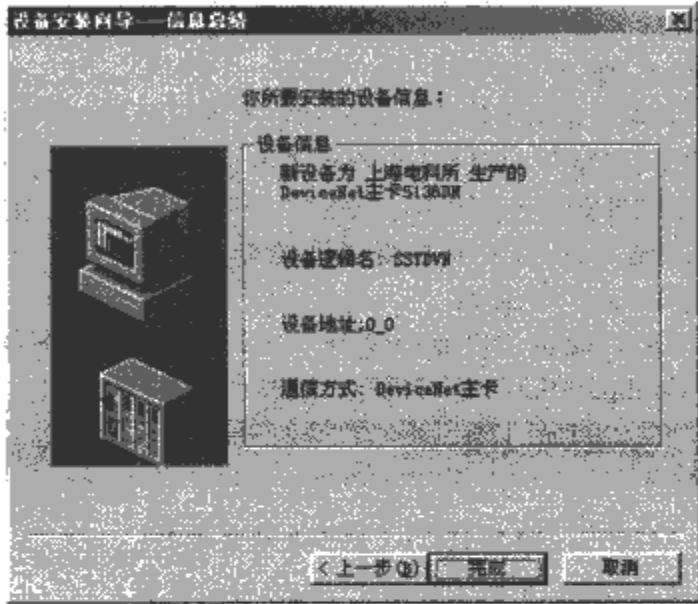


图 2.15-24 “设备安装向导——信息总结”对话框

该对话框显示添加的主站设备的信息，如生产厂家、型号、逻辑名、设备地址和通信方式等，如果您要修改其中的某一项的设定，可以按“上一步”按钮，返回相应的向导页，重新设定；确认无误，可以按“完成”按钮，结束设备配置向导。

单击“完成”按钮，则主站设备“DNet: SSTDVN”被添加到设备列表中，如图 2.15-25 所示。

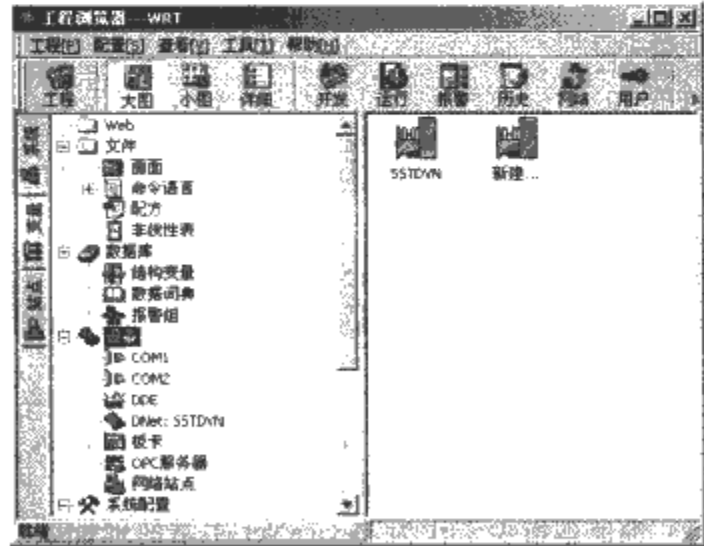


图 2.15-25 主站添加到设备列表

(2) 添加从站。

1) 添加管理类型。主站设备添加完毕之后，就可以添加从站设备了，在图 2.15-26 左边设备树中选中“DNet: SSTDVN”，再双击右方窗口中“新建...”，如图 2.15-26 所示。

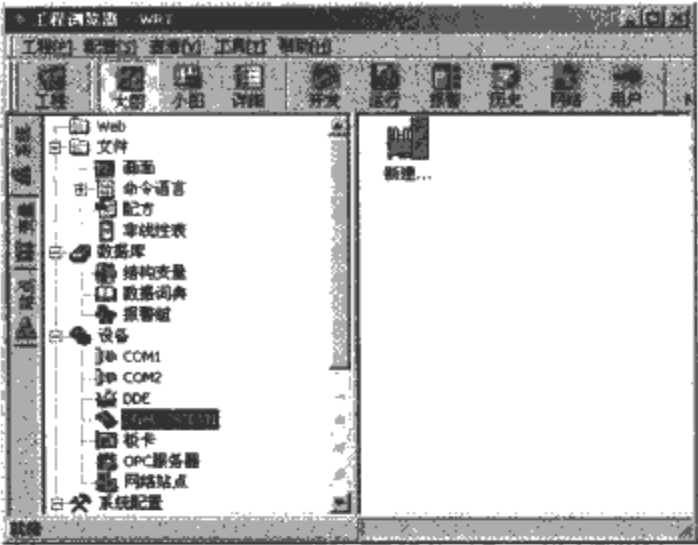


图 2.15-26 添加从站设备

弹出“从站设备定义”对话框，如图 2.15-27 所示。

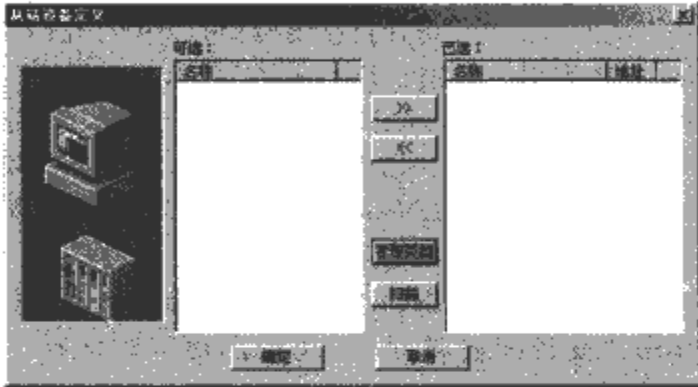


图 2.15-27 “从站设备定义”对话框

在该对话框中，左边列出的是可选的设备类型，右边是加入扫描列表的设备。

2) 添加设备类型。单击“管理类型”按钮，弹出“从站类型管理器”对话框，如图 2.15-28 所示。



图 2.15-28 “从站类型管理器”对话框

“从站类型管理器”对话框显示可选设备的名称、版本、最后修改时间、产品名称等信息，可以选择从 EDS 文件导入、从已知设备导入或复制已添加的设备三种方式添加从站设备，如图 2.15-29 所示。

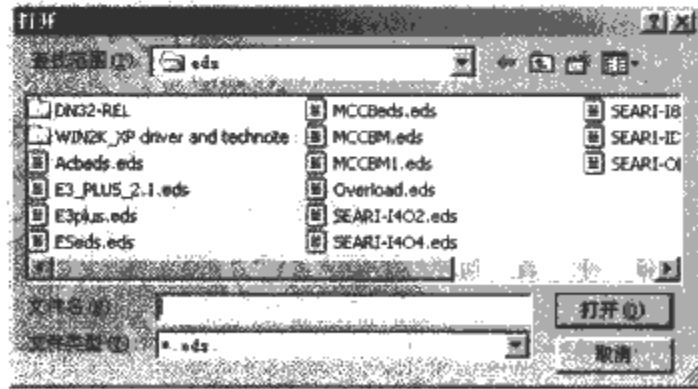


图 2.15-29 导入设备的 EDS 文件

(3) 导入 EDS 文件。EDS 文件是 DeviceNet 总线的从站设备定义文件，EDS 文件记录了从站设备可以被采集的信息大致情况，包括：

- 1) I/O 信息的各个模块及其字节数、访问方式等。
- 2) 显式信息总数, 各显示信息的名称、访问路径等。

从设备导入、扫描添加两种方式也可导入, 具体方法可查相关资料。

3.3 智能网络低压配电系统中的主要设备

全分布式结构必须构建在内部局域通信网络的基础上: 数据通信网是构成变电站自动化系统的关键环节, 内部通信网络及传输规约的标准化是使智能配电电能监测与控制迈向标准化的难点之一。

3S-Net 智能网络配电系统是基于我国第一个现场总线标准 GB/T 18858.3—2002《低压开关设备和控制设备控制器—设备接口 (CDI) 第3部分: DeviceNet》为核心的兼容其他总线的开放网络系统, 同时也适用于多总线系统以及第三方设备和高压设备的接入。

3.3.1 可通信的低压电器设备

智能低压配电系统的构建是基于可通信智能低压电器元件, 可通信电器主要有 ACB、MCCB、RCB、ATSE、接触器、I/O 模块、电量监控仪、无功补偿控制器, 上海电器科学研究所 (集团) 有限公司会同各行业厂制定低压电器通信规约, 规范了可通信低压电器的通信格式, 为可通信低压电器产品的通用性和互换性奠定了基础。针对 3S-Net 智能网络系统及多年配电领域的经验, 上海电器科学研究所 (集团) 有限公司开发了功能强大的可通信的万能式断路器 ACB、塑壳断路器 MCCB、VE1-D 电量监控仪、通信适配器 VT1-D 系列及网络延伸器。

上海电器科学研究所 (集团) 有限公司自主研发的专利产品 ACB、MCCB 均符合 GB/T 14048.2—2001、IEC 60947-2 标准。DW45、DW50、DW450 智能型万能式断路器、SZ 智能型塑壳断路器产品具有可通信功能, 满足电力系统网络化、信息化管理的要求, 实现“四遥”功能, 性能指标达到国际同类产品的先进水平, 符合 JB/T 10542—2006《低压电器通信规约》。

VE1-D 电量监控仪是以 32 位微处理为基础的全电子、高精度、多功能的电量监控仪, 用于监测配电线路的三相电压、三相电流、有功功率、无功功率、功率因数、累计电功率等电参量以及电网高次谐波的检测, 并且直接反应回路的运行情况。设备具有 RS485 通信或总线通信接口, 可以接入相应的数据网络。在配电系统中只要配置适当的监控器就可以监控整个系统的运行状态。不仅可监控低压配电网, 同时也适合中高压电网。产品符合 GB/T 17883—1999、GB/T 118858.3—2002、GB/T 17626.2、GB/T 17626.4、GB/T 17626.5、GB/T 13978.92 标准。

针对电力系统主要设备的协议转换的通信适配器, 满足断路器、双电源自动转换开关、电能表、无功补偿、MCC 柜等一系列应用对象的需求, 实现从设备层到控制层的无缝接入。通信适配器具有很强的兼容性, 除了提供标准协议转换外, 还提供灵活方便的可配置接入技术, 系统集成商可以根据接入产品的特点, 自行配置通信参数和数据格式, 可以极大的方便系统集成和工程应用, 实现多种工业通信协议之间的转换。现场总线适配器支持以 Profibus、DeviceNet 和 Modbus 为代表的重要的现场总线。适配器类型有 Profibus 总线适配器、DeviceNet 总线适配器、Modbus 总线适配器。每种产品都提供可编程和不可编程的总线适配器产品满足不同的应用需要。

3.3.2 远程 I/O 单元

远程 I/O 单元是低压配电系统中比较灵活的设备单元, 它安装在现场, 主要用来对现场 I/O 点的状态监测和控制。远程 I/O 单元可以将现场的传统控制系统设备接入到现场总线系统中来, 可以高效、低成本地使得系统升级。同时, 在低压配电系统中, 远程 I/O 单元也是一个具有功能灵活的模块, 使得系统集成更加方便。

在 3S-Net 智能配电与控制系统中的远程 I/O 单元, SEARI I/O SYSTEM 是上海电器科学研究所 (集团) 有限公司专门针对现场总线系统和分布式控制系统应用研发的 I/O 系列产品, 包括一系列独立的现场总线 I/O 模块。

远程输入输出终端模块, 用于连接工业控制系统中的各种现场装置, 如传感器、按钮、指示灯、阀门、变送器等现场装置的开关量及模拟量的输入、输出信号。产品按型号分为开关量输入及开关量输出型, 模拟量输入及模拟量输出型; 输出方式分晶体管 PNP 型输出, 晶体管 NPN 型输出; 继电器输出型等。

(1) 通用 I/O 模块基本特性:

- 1) 自由组合, 模块化。
- 2) 导轨安装, 方便快捷。
- 3) 可拆卸式接线端子, 节省布线时间。
- 4) 每个数字 I/O 口带有彩色 LED 灯指示通断状态。
- 5) 每个接线端子带有端子标记号。
- 6) 体积小, 节约控制柜空间。
- 7) 接线牢靠, 抗振动, 冲击。

现场总线可配置 I/O 模块品种齐全, 提供包括带有不同电位、电源和信号的数字量/模拟量的输入输出模块, 不同类型的模块可以自由组合使用, 最大的组合为 8 个模块。

(2) I/O 模块可分为以下两类:

1) 数字量 I/O 模块。数字量 I/O 模块类型包括 16 通道数字量输入模块、16 通道数字量晶体管输出模块、8 通道继电器输出模块、8 通道数字量输入 8 通道数字量输出模块。

2) 模拟量 I/O 模块。模拟量 I/O 模块类型包括 8 通道模拟量电压输入模块、8 通道模拟量电流输入 (4~20mA) 模块、4 通道模拟量输出模块、4 通道模拟量输出 (0/1~5V) 模块、4 通道模拟量输出 (-10~+10V) 模块。

3.3.3 网络延伸器

网络延伸器用于网络信号的放大、系统网络的连接长度延伸和多段网络之间的电气隔离。智能型网络延伸器还具有信号处理, 网络结构判断或总线错误诊断等智能功能。

对于一个中型网络构架, 网络延伸器是必不可少的网络连接和延伸设备。对于环境恶劣的小型网络系统, 使用网络延伸器增强系统的稳定性是最有效最低廉的手段。Profibus、DeviceNet 网络延伸器可以将 Profibus、DeviceNet 网络长度成倍拓展。

3.3.3.1 DeviceNet 网络延伸器

对 DeviceNet 网络延伸器 VTF1Y-D 来说, 在波特率为 125kbit/s 的情况下, 每增加一个延伸器可使网络长度延伸 500m, 增加延时最长为 2ms, 网络信息透明传输, 不需配置, 自动识别波特率。可以实现不同波特率网络信息的平等传输, 网络物理层电气隔离。适用于 DeviceNet 网络对于远距离节点的网络拓扑。VTF1Y-D 符合 IEC62026.3、GB 18858.3 等标准。

(1) DeviceNet 网络延伸器基本参数。

- 1) 最大信号延时时间: 2ms。

- 2) 波特率 (bit/s) 支持: 125, 250, 500k, 自动识别。
- 3) 总线接口: DeviceNet 标准开放式接口。
- 4) 供电电压: 两端标准 24V 外部供电, 工作电压范围 11~25V。
- 5) 供电电流: 主端口最大电流 150mA, 从端口最大电流 40mA。
- 6) 不同波特率网络中继: 支持。
- 7) 存储温度: (-40~80)℃。
- 8) 工作温度: (-20~80)℃。
- 9) 工作湿度: 25%~85%RH。

(2) 安装与供电。VTF1Y-D 可采用标准 H35-7.5 型安装轨, 拓展网络与本地网络电源隔离, 所以 VTF1Y-D 延伸器连接的两端网络均要独立 24V 供电 (11~25V 电压范围内也可工作)。连接方式如图 2.15-30 所示。

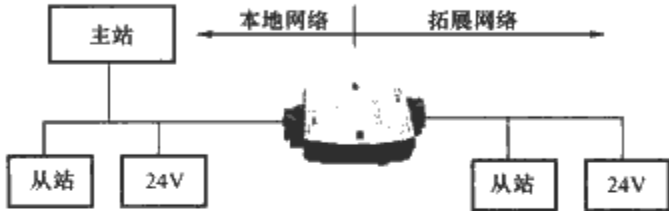


图 2.15-30 VTF1Y-D 在系统中的连接

(3) 端口接线。VTF1Y-D 延伸器的连接器采用开放式 DeviceNet 连接器, 有五个端子: 一对信号线、一对电源线和 一个屏蔽层。连接器符合 GB/T 18858.3—2002 中 8.4 条连接器的要求, 为插针型, 插孔型连接器与 DeviceNet 总线电缆相接。如图 2.15-31 所示。

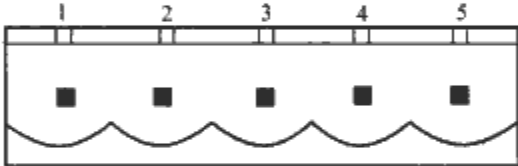


图 2.15-31 接线端子

- 1—1 号脚 (黑色) 接电源—; 2—2 号脚 (蓝色) 接 CAN_L;
- 3—3 号脚 (透明) 接屏蔽线; 4—4 号脚 (白色) 接 CAN_H;
- 5—5 号脚 (红色) 接电源+。

(4) 终端电阻。VTF1Y-D 延伸器产品两个端口内部没有终端电阻, 接入 VTF1Y-D 延伸器后, DeviceNet 网络硬件拓扑发生变化。根据 DeviceNet 网络拓扑的要求, 网络最远两末端需要安装 120Ω 终端电阻, 如果延伸器正好处于网络末端, 可根据工程需要, 在延伸器两个端外接 120Ω 终端电阻。如果产品上电后红灯亮, 一般要检查波特率设置 (见表 2.15-12) 以及终端电阻的拓扑情况。

表 2.15-12 波特率的开关设定

波特率 (kbit/s)	1	2
125	0	0
250	1	0
500	0	1
(自动)	1	1

注 每一侧的波特率必须和该侧网络的波特率一致。

- (5) 波特率设置方法:
- 1) 拨位开关设定。拨位开关向 ↓ 为 1。
 - 2) 自动波特率检测。当拨位开关设置成“自动状态”时, 如果该侧网络上有设备开始工作, 那么就可以侦测到该侧网络的波特率。若两侧网络的波特率都已经侦测到时, 模块灯呈“绿”色。

注意: 使用自动波特率检测的前提是网络上已有按既定波特率运行的节点, 要避免对单一节点网络的自动波特率检测, 以防止“孤立节点”状态。

(6) 不同波特率网络的拓展。Devicenet 网络延伸器两端可以使用不同的波特率, 只要保证每一侧的波特率设置与该侧网络一致, 就可以实现不同波特率网络的拓展。不同波特率与网络拓展距离见表 2.15-13。

表 2.15-13 波特率与网络拓展距离

拓展网络侧波特率 (kbit/s)	125	250	500
拓展长度 (m)	500	200	100

(7) 网络延时。

- 1) 接入一个延伸器 VTF1Y-D, 将引入延时时间 $T_d = 2ms$ 如果网络中向一个延伸方向接入 N 个延伸器, 则引入延时 $T_s = 2Nms$ 。
- 2) 网络延伸器不能接成环形网络。

3.3.3.2 Profibus-DP 网络延伸器

在 Profibus-DP 网络中加装网络延伸器, 可以有效地延长网络距离, 增加节点的接入数目, 减弱 Profibus-DP 网络传输中的干扰信息, 同时保证 Profibus-DP 信号的幅值。

Profibus-DP 的物理层采用的是 RS-485 通信方式。对一段网段在不同波特率下支持的最大网络长度如表 2.15-14 所示。

表 2.15-14 Profibus-DP 网段长度和波特率的关系

波特率 (kbit/s)	9.6	19.2	93.75	187.5	500	1500
类型 A 电缆 (m)	1200	1200	1200	1000	400	200
类型 B 电缆 (m)	1200	1200	1200	600	200	70

Profibus-DP 规约规定一个网段最多允许拥有 32 个站。普通型不带诊断功能的中继器不占用站地址, 但计算在一个网段的站数内。智能型带诊断功能的中继器占用一个站地址, 采用读取从站参数的方式向主站传送网络诊断信息。当站数超过 32 时, 由于各节点之间是并联的, 就降低了整个网络的负载电阻, 使输出电压降低, 信号幅值也就跟着降低, 所以必须使用中继器。使用中继器可使网络的传输距离延长 1200m。一个 Profibus-DP 网络系统里, 最多只允许拥有 9 个中继器。图 2.15-32 所示为一个典型的使用了中继器的网络系统。

在一个网络上由于电阻的不匹配就会产生反射, 使系统通信产生误码。所以为了防止信号在网络上传输时产生反射, 在每段网络的起始和结束端必须加终端电阻, 目的就是为了让网络上的电阻匹配, 如图 2.15-33 所示。终端电阻定义如图 2.15-34 所示。

3.3.3.3 VTF1Y-P 网络延伸器

VTF1Y-P 网络延伸器是上海电器科学研究所 (集团) 有限公司专门针对工业应用而开发的高性能光电隔离式网络延伸器, 采用自动双向切换技术, 无须存储信号。不改变应用层的网络协议, 也不破坏原有的 Profibus 底层协议, 延时间短。两信号端具有双重防静电防浪涌功能, 使产品使用寿命更长。光电隔离功能可以更有效的保护设备和网络。

(1) 性能指标及技术参数。

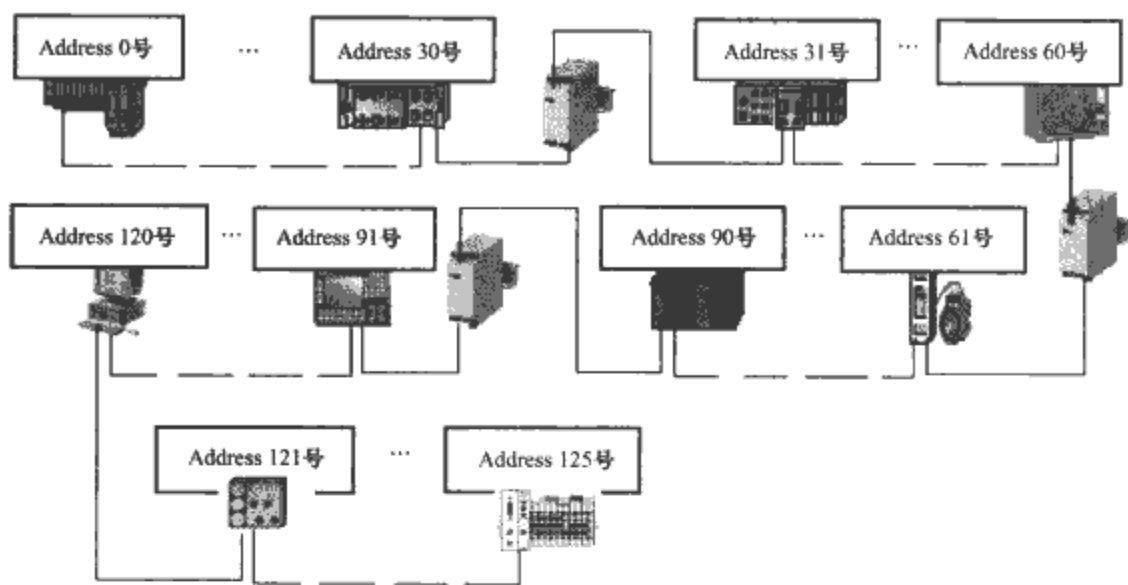


图 2.15-32 典型网络系统

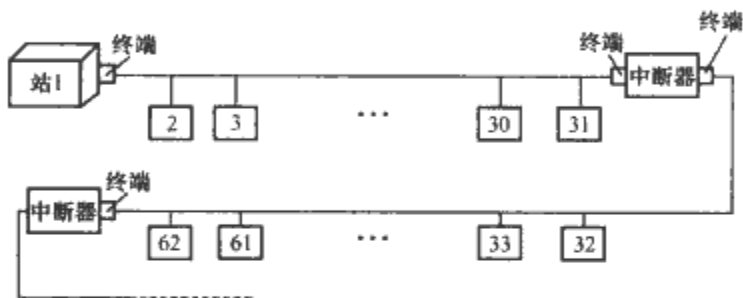


图 2.15-33 网络中加入终端电阻

- 1) 接口标准: DB9 连接器。
- 2) 传输距离: 每增加一个网络延伸器, 使网络距离延长 1200m。
- 3) 波特率 (bit/s) 支持: 9.6k, 19.2k, 93.75k, 185.5k, 500k, 1.5M, 自适应波特率。
- 4) 电源电压 $DC\ 24V \times (1 \pm 5\%)$, 内部工作电源电压 $DC\ 5V \times (1 \pm 5\%)$ 。
- 5) 额定工作电流: $\leq 100mA$ 。
- 6) 隔离: 两段网段之间电气隔离, 隔离电压达 2500V。
- 7) 工作温度: $(-40 \sim 85)^{\circ}C$ 。
- 8) 工作方式: 半双工。
- 9) 通信协议: 透明。

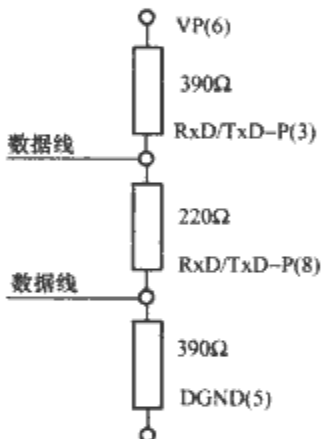


图 2.15-34 终端电阻定义

(2) 工作原理如图 2.15-35 所示, 在 Profibus-DP 网络中, 网络延伸器接收信号后, 由收发控制器判断并控制信号的传输方向, 通过光耦隔离回路传输到另一端, 并由另一端的控制器控制收发器将信号传输到网络中去。由于没有将信号转存再发送, 使信号的延迟达到纳秒级。

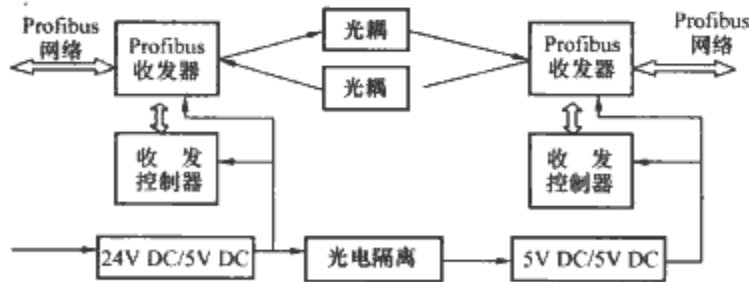


图 2.15-35 VTF1Y-P 网络延伸器工作原理图

3.3.4 上位计算机与 SCADA 监控软件

在计算机控制系统中, 除了硬件电路外, 还有软件, 软件是工业控制机的程序系统, 它可分为系统软件、支持软件和应用软件三部分。所谓应用软件就是面向控制系统本身的程序, 它是根据系统的具体要求, 由用户自己设计的。在进行计算机控制系统的设计时, 大量的工作就是如何根据各个

生产过程的实际需要设计应用程序。

目前, 越来越多的控制工程师已不再采用从芯片→电路设计→模块制作→系统组装调试→的传统模式来研制计算机控制系统, 而是采用组态模式。计算机控制系统的组态功能可分为两个主要方面, 即硬件组态和软件组态。

(1) 硬件组态通常以总线式工业控制机为主进行选择和配置。总线式工业控制机具有小型化、模块化、标准化、组合化、结构开放的特点, 因此在硬件上可以根据不同的控制对象, 选择相应的功能模板, 组成各种不同的应用系统, 使硬件工作量几乎接近于零, 只需按要求对各种功能模板安装与接线即可。

(2) 软件组态常以工业控制组态软件为主来实现。工业控制组态软件是标准化、规模化、商品化的通用过程控制软件, 控制工程师在不必了解计算机的硬件和程序的情况下, 在 CRT 屏幕上采用菜单方式, 用填表的方法, 对输入、输出信号用“仪表组态”方法进行软连接, 这种通用树形填空语言有简单明了、使用方便等特点, 十分适合控制工程师掌握应用, 大大减少了重复性、低层次、低水平应用软件的开发, 提高了软件的使用效率和价值, 提高了控制的可靠性, 缩短了应用软件的开发周期。因此, 工业控制组态软件是性能优良的软件产品。

近几年来, 工业控制组态软件得到了广泛的重视和迅速的发展。目前, 我国已开发出很多成功的组态软件, 而且技术发展很快, 与国际水平相差不大, 当然有些国外的组态软件也已开始了汉化工作。大多数的组态功能是离线进行实现的, 即在应用系统的设计开发阶段仔细地完成系统的组态配置。

控制系统的软件组态是生成整个系统的重要技术, 对每一个控制回路分别依照其控制回路图进行。组态工作是在组态软件支持下进行的, 组态软件主要包括: 控制组态、图形生成系统、显示组态、I/O 通道登记、单位名称登记、趋势曲线登记、报警系统登记、报表生成系统等方面的内容。有些系统可根据特殊要求而进行一些特殊的组态工作。控制工程师利用键盘, 以人机对话方式完成组态操作, 系统组态结果存入磁盘存储器中, 以作为运行时使用。

3.4 智能网络低压配电与控制系统功能

3.4.1 数据采集和处理

(1) 全站各种模拟量、状态量、电度量采集, 并以图形表格方式显示记录。系统对配电主要设备的运行状态和运行参数自动定时采集, 并做必要的预处理, 存于实时数据库,

供计算机系统实现画面显示、制表打印及完成各种计算、控制等设计功能使用。

(2) 测量异常、断路器、隔离开关和保护动作等异常情况报警并记录。电站现场各种数据的采集基本由各自的智能设备完成。现场数据包括：数字量、一般开关量和中断开关量。一般开关量包括隔离开关、接地开关状态和故障监视信号等。中断开关量包括母线和线路以及厂用断路器和继电保护等开关信号，因一个事故可能引起一连串的开关量动作，需采用中断方式对这类信号进行采集，以提高分辨率。

(3) 实时数据统计，累加并记录。为适应现场运行情况，对所有采集的数据点均可通过人机联系设置扫描投入与退出、报警使能与禁止标志，对其参数限值可进行人工修改设置，并可用人工设置值替代采集值。

(4) 事件顺序记录、打印。

3.4.2 安全运行监视

安全运行监视包括状态变化监视、越限检查、过程监视、趋势分析和监控系统异常监视。

(1) 模拟量临界点预警。在 3S-Net 系统中，针对每个模拟量可设置低低报、低报、高报、高高报四个临界点值，如图 2.15-36 所示。

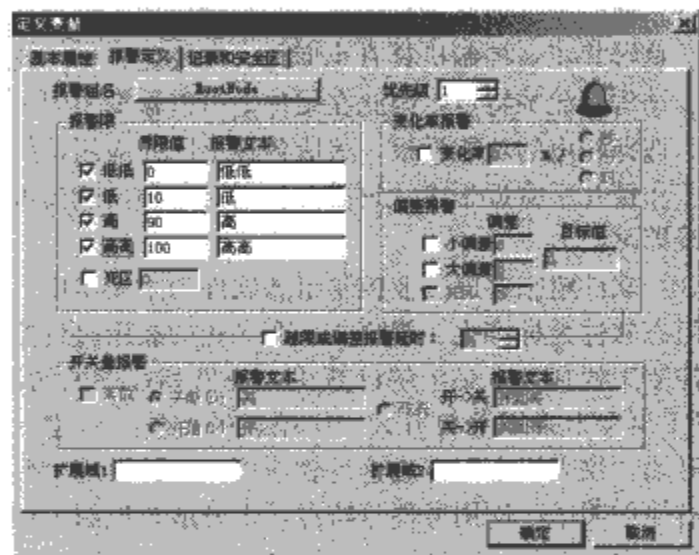


图 2.15-36 报警定义窗口

一旦模拟量的值超过临界值，会自动弹出报警窗口，如图 2.15-37 所示。

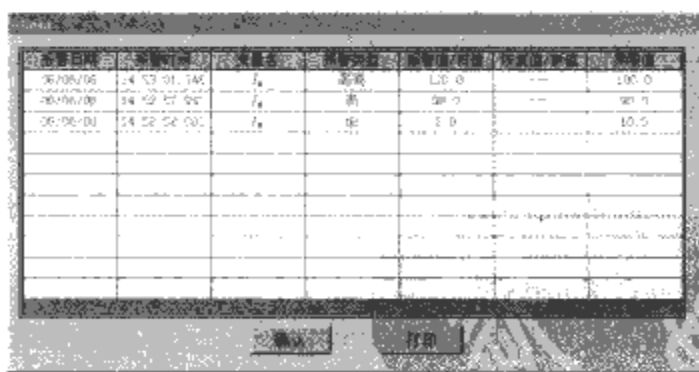


图 2.15-37 报警窗口

(2) 快速诊断功能。3S-Net 系统可根据接收到的数据，判断出系统中的哪些设备出现故障，并弹出一个窗口，将故障信息显示给用户。

(3) 为了实现电力系统节能，配电系统需要在用电的峰、平、谷时段实现某些用电设备的自动投切。在 3S-Net 系统中，上位机软件为用户提供一个峰、平、谷时段的配置工具，如图 2.15-38 所示。

3.4.3 数据库系统

系统提供实时数据库和历史数据库两种。

(1) 实时数据库。实时数据库保存的是从各个节点采集

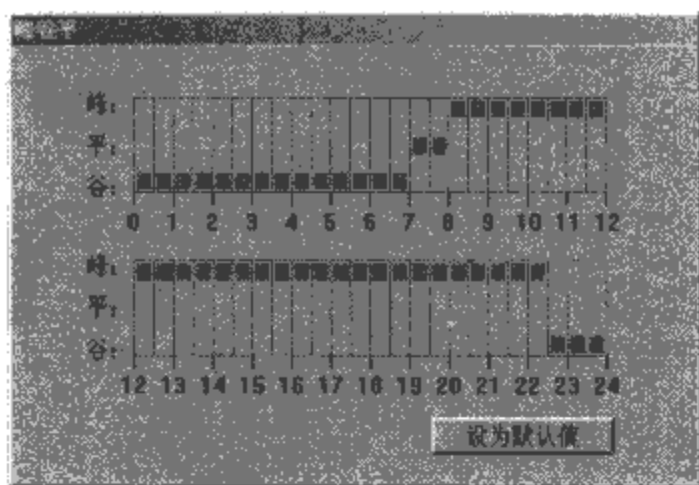


图 2.15-38 峰、平、谷时段设置窗口

来的实时数据，其数据在每次系统扫描周期之后刷新一次。在实时数据库中保存模拟量、数字量、电度累计量、控制量、计算量、参数设定值等许多类型的数据。数据库管理系统保证了对数据库访问的实时性、灵活性和数据的一致性。

(2) 历史数据库。对每一个实时数据库中的点，可选定周期实现历史数据记录，并可按操作用户、设备名称、日期时间进行分类查询历史数据库，形成数据表、趋势曲线和用于统计分析。历史数据库的压缩数据可保存一年。

3.4.4 图形功能

(1) 提供电力系统标准图元符号，制图时直接调用，使画面标准、统一。

(2) 提供丰富而便利的图形编辑功能，画面设计方便自如。

(3) 提供电压负荷曲线、系统配置、系统接线等画面。

(4) 面向对象的画面直接操作，根据所选对象的权限提供相应操作菜单。

3.4.5 报表系统

(1) 报表编辑的在线生成和修改。

(2) 灵活的制表功能，可轻松愉快地生成各种复杂报表。

(3) 数据库的连接制表。

(4) 定时打印、实时打印或召唤打印。

3.4.6 控制操作

(1) 断路器的合闸、分闸操作。

(2) 电容器组的手动投切或自动投切。

(3) 有载调压变压器分接头的调节操作。

3.4.7 保护管理功能

(1) 获取保护设备的运行信息、故障动作信息、自检信息等。

(2) 获取保护运行定值。

(3) 修改和下装保护定值。

(4) 保护信号复归。

3.4.8 告警功能

(1) 开关变位告警。

(2) 保护动作告警。

(3) 测量越限告警。

(4) 设备异常告警。

(5) 画面闪烁，且伴有音响告警。

3.4.9 事件顺序记录 (SOE) 及打印

可记录遥信变位、故障信息等事件，并可存储 5000 个 SOE 历史记录并打印。

3.4.10 权限管理

系统共分三级用户权限管理。

(1) 系统管理员。全权用户,拥有系统所有权限,包括浏览、发控制命令、修改参数、用户管理、关闭系统等。

(2) 操作员。日常操作维护,仅限于浏览和发控制命令,不能修改参数。

(3) 浏览用户。仅有浏览权限,没有控制、参数修改、关闭系统等权限。

智能网络低压配电与控制系统功能很多,除了必须保证所选系统功能满足电能监测与控制的需要之外,还要求技术有一定的先进性和可靠性,防止由于功能欠缺影响系统以后的安全运行。

4 低压电器产品的通信性能测试

对于低压电器产品在通信系统中的描述,各工业国家的现场总线是在工业规范中提供的各不相同的行规。对可通信低压电器共性技术的规定,一般包括:通信中的系统拓扑方式、现场总线的类型、数据通信参数表、低压电器的数据交换接口形式、使用通信适配器来连接上层现场总线系统、检测的要求、工业规范和版本号、工业运行软件环境等。

低压电器可直接或通过通信适配器与 Modbus、DeviceNet、Profibus-DP 等现场总线系统通信。采用通信适配器的低压电器需要同时符合两层现场总线的规范。对通信的方式、传送信息的格式、参数类型、数据编码等要素要满足相关约定。

低压电器产品的通信性能测试,一般在通信实验室内进行。有条件时推荐与低压电器的型式试验同时进行。所述试验应在连接相应的上层现场总线的系统中进行。按对应数据通信参数表进行通信,对所通信的参数进行认定。各种设备有可能因互相之间的影响,而导致可重复的通信失败或导致某设备失效。为保证通信成功,测试应在同一系统中对各种设备同时进行通信测试。若无影响,则相关设备具有可互操作性,可以在同一系统中工作。能进行全部内容通信的,认定为合格。一些试验条件尚不具备的参数,如大电流、瞬动电流值、标志位,可用模拟数据进行。

通信性能测试系统中,至少连接两家以上其他生产商符合本标准的同类低压电器,进行互操作性测试。在整个运行试验期间,互相不应有导致可重复的通信失败情况。检测的要求按不同层面的现场总线进行,除了分别按 Modbus、DeviceNet、Profibus-DP 相应标准要求认证外,还需要符合它们所引用的 CAN、RS485 的有关规范。如果这些标准规定可以免测,则按照相关标准的规定。当采用 RS485 的 Modbus、Profibus-DP 时,波特率为 19200bit/s、子站数目为 1、连接长度在 10m 之内,则按 RS485 的规定,有关的性能可以免测。

4.1 需要一致性测试的原因

为了确保低压电器产品从物理层到应用层都能符合相应通信规约的技术要求,满足一致性、可靠性和互操作性的开放原则,产品在投放市场前,都需要进行独立测试实验室的一致性认证测试。

一致性测试是自愿的,开发者可以自测本方产品以保证其与相应技术规范的吻合。但是,只有通过相应独立实验室的测试,才可以获得相应一致性测试认证标志,如 Modbus、DeviceNet、Profibus-DP 等。独立实验室的测试比自我测试更加完善,并会帮助开发者查找和分析产品测试失败原

因和设计缺陷,同时开发者可以从产品测试中获取更多的产品知识。一致性测试的目的是促进和推动不同供货商之间设备的互操作性,在此以 DeviceNet 通信总线为例加以说明。

对于像 DeviceNet 这样一个由多制造商支持的开放式设备层现场总线,为保证种类繁多的 DeviceNet 产品的可互换性及可互操作性,ODVA(开放式设备供货商协会)要求每种 DeviceNet 产品在投放市场之前需通过一致性测试。用户在产品开发过程中可以向 ODVA 购得一致性测试软件。在所开发产品通过预测试后,再送交 ODVA 独立测试实验室进行第三方认证测试。ODVA 允许制造商在其产品通过独立实验室全部测试项目后,在产品上加上 DeviceNet 一致性测试服务标志。

ODVA 独立实验室的一致性测试是非强制性的。根据 DeviceNet 使用条例,所有产品必须经过制造商使用 ODVA 提供的一致性测试软件测试。可以使用的非 ODVA 实验室测试结果的声明字样仅为“本产品已经制造商自我测试,符合 ODVA 协议一致性测试。版本号___”。不可使用有关物理层或可互操作性一致性声明。因为 ODVA 不承认这两种自我测试。

4.2 一致性测试的内容和方法

对被试产品的测试操作将按照相应总线的最新版本的测试内容进行。本节仍以 DeviceNet 产品为例说明一致性测试的内容和方法。

(1) 独立实验室进行低压电器产品的一致性测试时,开发制造商须提供:

- 1) 正确的产品 STC 数据文件。
- 2) 所有在网络上组态和使用产品必须的组态工具和文件。
- 3) 在首次进入实验室时,派员协助其产品运行所需的设置和组态。若制造商决定不派员,但至少制造商应提供预先组态的产品,该产品一旦上电即可运行。应提供特定的说明书,清楚表明所有必要的电气连接,以保证其在网络上的功能。
- 4) 与产品设置,连接和组态有关的任何辅助(非网络)电源或固定设备。
- 5) 与 STC 文件相一致的 EDS 文件。
- 6) 所有测试必备的设备。制造商不可因测试目的,而在实验室测试 PC 上安装其他软硬件。

(2) DeviceNet 产品一致性测试主要包括以下几个方面的内容:

1) DeviceNet 物理层测试。主要是测试 DeviceNet 产品单机的物理特性,通过对 CAN 信号的检测以及对电流电压的检测,来验证 DeviceNet 产品的物理接口是否符合 DeviceNet 规范中关于物理层的要求。例如,工作电压和电流是否在允许的范围内,连接器和指示灯是否符合 ODVA 技术规范等。物理层的测试原理如图 2.15-39 所示。

测试方法按 ODVA 颁布的物理层、状态指示灯和开关的测试程序执行。

2) DeviceNet 协议一致性测试。ODVA 已经开发了基于 PC 的一致性测试软件,以满足产品开发商有关需求。测试主要通过 DeviceNet 板卡和 DeviceNet 主站,以发送报文和接受报文的方式,来判定 DeviceNet 产品五大对象:标识对象、DeviceNet 对象、路由对象、组合对象、连接对象的一致性和完整性,以此验证产品是否符合 DeviceNet 以及 DeviceNet 附加的信息和报文要求。这也是一个单机测试。DeviceNet 协议一致性测试原理如图 2.15-40 所示。

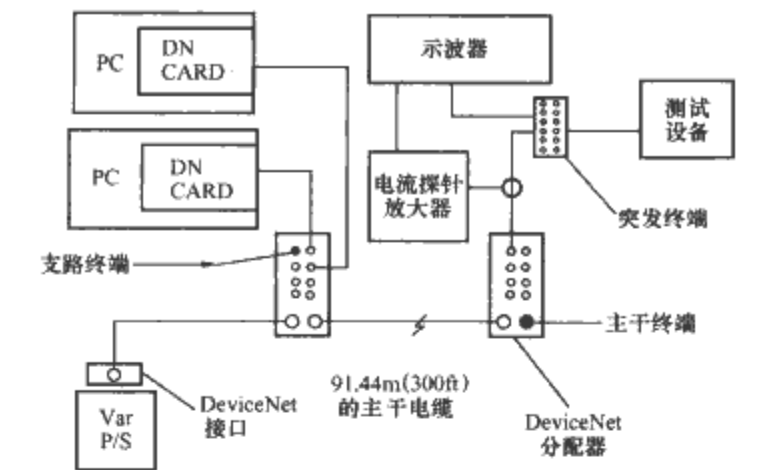


图 2.15-39 DeviceNet 物理层测试原理图

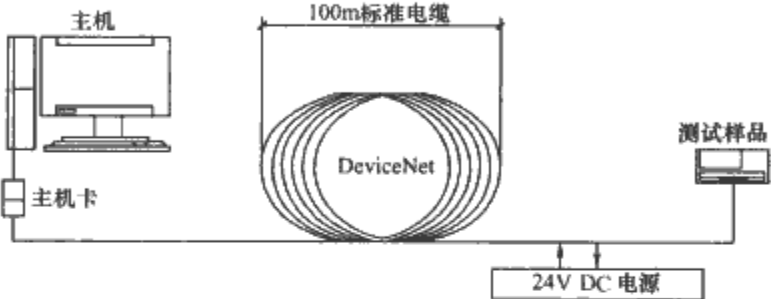


图 2.15-40 DeviceNet 协议一致性测试原理图

3) DeviceNet 电子数据 (EDS) 文件测试。验证产品的 EDS 文件，即制造商提供的 ASICII 文本文件，是否语法正确、符合规范。这个文件用来帮助 DeviceNet 网络配置工具、设置网络和设备参数。ODVA 也提供 EDS 文件测试软件，以满足产品开发商有关需求。用户在产品开发过程中，可以向 ODVA 购得此 EDS 测试软件的最新版本，在研发过程中进行调试和自我测试。当产品送交独立测试实验室进行测试时，需要提供该产品的 EDS 文件。

4) DeviceNet 系统 (互操作性) 测试。验证 DeviceNet 产品是否能在多供货商产品组成的 DeviceNet 网络系统中正常运行，以保证被测试设备的互操作性，即接入网络后不影响网络运行，同时不受网络载荷和突发事件影响的能力。产品安装在 64 个节点、由多家供货商产品组成的网络上，运行在针对潜在系统互操作性问题而专门设计的频繁切换、动态变化的模拟工作环境中，产品必须保证在不同的上电顺序下打开和建立显式 I/O 信息连接，还要在任何一个节点去除和接入过程中保持网络连接。测试还要验证产品在重负荷网络上能否和多家供货商的主站正常工作，不同供货商的配置工具是否可以通过其 EDS 文件对产品进行设置。

在此测试系统中，网络功能如重复 MAC 地址校验和再起动将被测试。网络 I/O 通道由指定主站生成。分立的测试站在测试过程中生成显式报文。测试中的设备将至少运行 2h。该测试将检查被测试设备是否降低可运行网络的功能。DeviceNet 互操作性原理如图 2.15-41 所示。

测试方法按 DeviceNet 互操作一致性测试程序执行。如果供货商生产制造 DeviceNet 特殊产品，例如网络电源、嵌入式芯片等，ODVA 也提供此类特殊产品的认证测试。DeviceNet 电源测试，主要验证网络电源产品能否提供必需的总线电压和电流，能否工作在不同的总线负载条件下。嵌入式技术测试主要针对半导体制造商的芯片级产品。进行半导体测试的产品必须首先通过常规系列测试内容，追加的测试内容包括对连接器、指示灯、拨位开关、隔离环节、电源环节，以及其他环节的一致性测试。

4.3 典型的一致性测试系统(以 DeviceNet 一致性测试为例)

在低压电器产品的一致性测试中，需要构建一个采用相

应通信总线的测试网络系统。这个测试系统应模拟相应总线规范中所定义的最极限运行环境，如最大网络节点数、最高通信速率和最长网络距离等。本节仍以 DeviceNet 总线为例介绍一致性测试系统。

DeviceNet 是一种低成本的通信链接、简单的网络解决方案。在提供多供货商同类部件间可互换性的同时，减少了配线和安装工业自动化设备的成本和时间。DeviceNet 的直接互连性不仅改善了设备间的通信，同时提供了相当重要的设备级诊断功能。

目前国内唯一一个 DeviceNet 测试系统在上海电器设备检测所内。该系统由两个测试架组成，共有 63 个节点，其中 54 个节点是模拟量、数字量 I/O 模块，其余的节点是多个供货商的产品，包括变频器、塑料外壳断路器、电量监控仪、通信适配器、电动机保护器以及 PLC、网络延伸器等。主站有首选和备用两个。系统以 I/O 模块作为陪试品，总的节点达到了满额度 64 个。在测试架后面安装了两个电缆盘，一个 100m，另一个 500m，这分别是波特率为 500kbit/s 和 125kbit/s 下最长的网络距离。试验就是运行在这样一个高速满负荷长距离的工作环境中。通过不同的电源通断、上电顺序、设备插拔和网络重负荷等测试，验证 I/O 连接、显式信息应答、根据 DeviceNet 协议下的间歇网络连接和操作等。试验不只要求产品在一套主站下能进行工作，还要求在切换到另外一套主站下也能正常工作。这个测试主要有两个目的，一是验证产品的互操作性，也就是产品自身的运行首先要不影响网络的运行，同时网络的运行不影响产品的运行；二是验证产品的可靠性，即产品在实际满负荷网络运行条件下是否能够可靠运行。

该系统的测试原理图可见互操作性测试原理图 2.15-41。该系统中的测试设备及节点地址安排如表 2.15-15 所示。

表 2.15-15 设备与节点对照表		
设备名	节点号	备注
1747-SDN	0	主站
1784-PCIDS	62	配置工具
电量监控仪	1, 2	从站
交通灯	3	从站, 由 DT-OD08-R 控制
台达变频器	4	从站, 适配器 DN02
MCCB 断路器	5, 6	从站, 适配器 DT-MCCB_COMM
DT-ID16	8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34, 38, 40	从站, 16 点开关量输入模块
DT-OD16	9, 11, 15, 17, 21, 23, 27, 29, 33, 35	从站, 16 点开关量输出模块
DT-ID08	12, 13, 18, 19, 24, 25, 30, 31, 36, 37	从站, 8 点开关量输入模块
DT-OD08-R	44, 45, 46, 47	从站, 8 点继电器输出模块
DT-ID8OD8	50, 51, 52, 53, 56, 57, 58, 59	从站, 8 点开关量输入 8 点开关量输出模块
DT-ID4OD4	42, 43, 48, 49, 54, 55, 60, 61	从站, 4 点开关量输入 4 点开关量输出模块
电动机保护器	63	从站

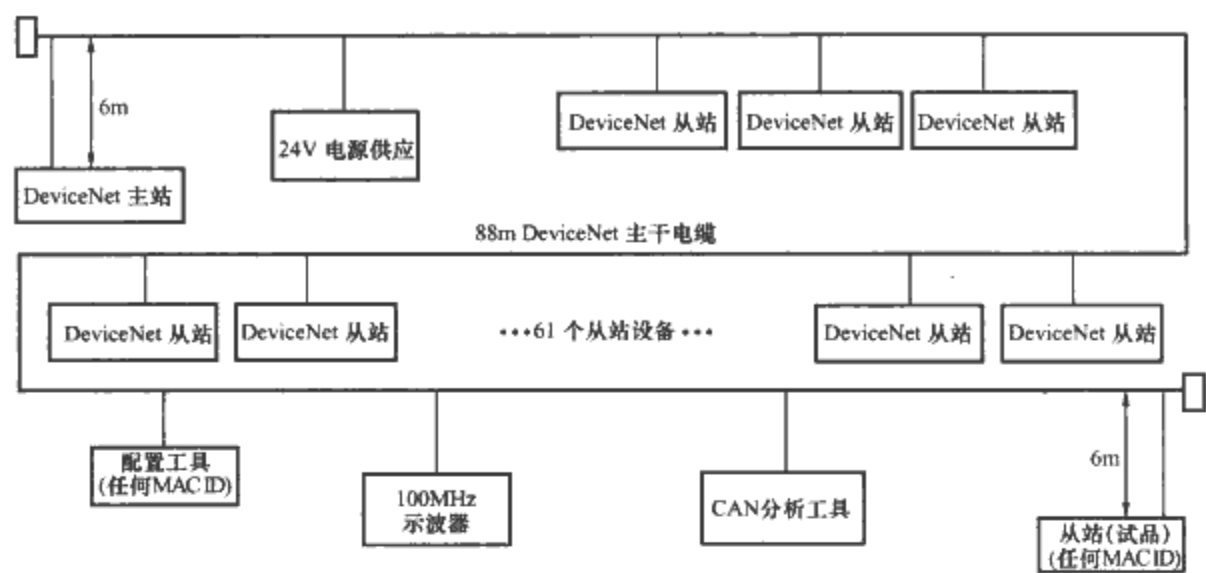


图 2.15-41 DeviceNet 互操作性原理图

根据互操作性测试系统原理，互操作性测试需要 64 个设备能够在 DeviceNet 网络上正常运行。经 AB 板卡 1784-PCID 的网络配置，该系统中 AB 主站的扫描列表及地址映射如表 2.15-16 所示。

表 2.15-16 I/O 报文映射表

输出报文地址	高字节(D15~D8)	低字节(D7~D0)
O _i 1.0	内部使用(只读)	
O _i 1.1	04	
O _i 1.2	04	
O _i 1.3	06	05
O _i 1.4	09	
O _i 1.5	11	
O _i 1.6	15	
O _i 1.7	17	
O _i 1.8	21	
O _i 1.9	23	
O _i 1.10	27	
O _i 1.11	29	
O _i 1.12	33	
O _i 1.13	35	
O _i 1.14	39	
O _i 1.15	41	
O _i 1.16	43	42
O _i 1.17	45	44
O _i 1.18	47	46
O _i 1.19	49	48
O _i 1.20	51	50
O _i 1.21	53	52
O _i 1.22	55	54
O _i 1.23	57	56
O _i 1.24	59	58
O _i 1.25	61	60
O _i 1.26		03
O _i 1.27		
O _i 1.28		
O _i 1.29		
O _i 1.30		

续表

输出报文地址	高字节(D15~D8)	低字节(D7~D0)
O _i 1.31		
M ₀ 1.0		
M ₀ 1.1		
M ₀ 1.2		
M ₀ 1.3		
M ₀ 1.4		
M ₀ 1.5		
M ₀ 1.6		
M ₀ 1.7		
M ₀ 1.8		
M ₀ 1.9		
M ₀ 1.10		
M ₀ 1.11		
⋮		
M ₀ 1.21		
M ₀ 1.22		
⋮		
M ₀ 1.32		
M ₀ 1.33		
I _i 1.0	内部使用(只读)	
I _i 1.1	04	
I _i 1.2	04	
I _i 1.3	05	
I _i 1.4	05	
I _i 1.5	05	
I _i 1.6	05	
I _i 1.7	05	
I _i 1.8	12	05
I _i 1.9	06	
I _i 1.10	06	
I _i 1.11	06	
I _i 1.12	06	
I _i 1.13	06	
I _i 1.14	13	06
I _i 1.15	07	

续表

输出报文地址	高字节(D15~D8)	低字节(D7~D0)
I _i 1.16	07	
I _i 1.17	07	
I _i 1.18	18	07
I _i 1.19	08	
I _i 1.20	10	
I _i 1.21	14	
I _i 1.22	16	
I _i 1.23	20	
I _i 1.24	22	
I _i 1.25	26	
I _i 1.26	28	
I _i 1.27	32	
I _i 1.28	34	
I _i 1.29	38	
I _i 1.30	40	
I _i 1.31	24	19
MI _i 1.0	30	25
MI _i 1.1	36	31
MI _i 1.2	42	37
MI _i 1.3	48	43
MI _i 1.4	50	49
MI _i 1.5	52	51
MI _i 1.6	54	53
MI _i 1.7	56	55
MI _i 1.8	58	57
MI _i 1.9	60	59
MI _i 1.10	1	61
MI _i 1.11	1	
⋮	⋮	
MI _i 1.21	1	
MI _i 1.22	2	
⋮	⋮	
MI _i 1.32	2	
MI _i 1.33	2	

5 可通信低压电器发展动态

随着信息技术的飞速发展，工业自动化和楼宇自动化技术有了极大的提高，新技术新产品层出不穷，近年来这些技术的发展已快速地渗入到低压电器领域，使得低压电器领域智能化和可通信技术信息化也得到了快速地发展。随着不同专业领域对通信内容、开放性、实时控制提出了更高的要求，工业以太网技术应运而生，并有望成为下一代系统工业设备通信和控制技术发展的主流技术。

5.1 应用于低压电器的总线技术发展

5.1.1 工业现场总线技术

工业现场总线的发展越来越注重系统的开放性，一方面各总线组织通过设备描述规范设备在网络上的特性，使不同厂商的设备在网络上有相同的表现，可互连互换；另一方面系统提供方便的非标准第三方设备的接入，同时支持连接多种不同的总线，这样可使用户在配置系统时有更大的灵活性。开放总线的发展使设备制造商看到支持总线的设备具有更好的市场前景，而且越来越多支持总线产品的出现也方便了用户选用，由此系统开放性和支持多总线将是工业现场总

线的发展潮流。

5.1.2 建筑电气总线技术

随着技术发展和经济的增长，人们对工作和生活环境提出更高的要求，建筑物内的电器设备和自动化程度迅速提高，现代网络技术同样渗入如低压电器设备等建筑电气领域，由于建筑电气领域通信与控制因使用环境、连接的对象和信号传递要求不同于工业自动化领域，因此形成专门的建筑电气总线，近年来建筑电气总线发展势头强劲。

目前主要的建筑电气总线有：BACNet、Lonworks、EIB 等，Lonworks 和 EIB 是设备层的总线，BACNet 是管理层的总线。目前建筑电气三大总线技术均发展迅速，各自的协会均有近百家的会员，在相当长一段时间里将引领建筑电气总线技术的发展。

随着楼宇自动化要求日益增多，不同的建筑电气总线在一段时间内会并存和各自不断完善，但也将相互渗透和趋于统一、混合、重组，不久的将来可能会出现统一的楼宇自动化系统。

5.1.3 工业以太网技术

近年来，工业以太网技术发展迅速，这个原来用于 IT 领域的标准，在信息网扩展中得到迅速的发展，不断提高的性能和迅速降低的成本是现有任何工业自动化网络无法比拟的，使工业自动化领域的一些公司不约而同地将注意力集中在利用以太网的资源上，所以新一代的工业自动化网络几乎都是建立在以太网基础之上，使工业以太网成为当前的技术热点，并有可能成为下一代低压电器设备等通信和控制的主流技术。

由于各种工业以太网技术在实时性、开放性、实现的功能上都会有很大差异，统一的工业以太网协议在相当长一段时间内可能还无法实现，但是网络的实时性、安全性（在开放的同时防止非法的侵入）和适合工业环境等方面有很多共性技术，可能将通过合作建立统一的基础，这样有利于工业以太网技术的快速发展和在低压电器等领域的推广应用。

5.2 低压电器元件与系统的发展

(1) 工业现场总线技术在低压电器中的应用越来越广泛，一方面国内外新一代低压电器元件都具有内置或外置的通信接口，能与工业现场总线相连接；另一方面嵌入现场总线系统的低压配电和控制成套装置也逐渐推出，从而嵌入现场总线技术将成为新一代低压电器元件和成套装置的一个重要标志，并正向支持多总线（多种协议互连）、更多数据、更高速度、更强大功能、更方便接入的元件与系统方向发展。

(2) 嵌入总线技术的低压电器元件与系统将从传统的配电保护与控制功能实现故障预警、区域保护、控制与连锁及快速诊断与安全恢复的智能化低压电器元件与系统发展。

(3) 现场总线低压电器系统将逐步向中、高压系统延伸，实现数据交换和统一控制。

(4) 我国对建筑电气总线技术的研究与应用还刚刚起步，但随着建筑业的蓬勃发展，尤其是智能楼宇（楼宇自动化）需求日益增多，建筑电气总线技术在我国的应用与发展将驶入快速通道，建筑电气总线将首先嵌入建筑电器，尤其是终端电器元件与系统中，实现智能远程终端配电保护与控制系统，具有美好的前景。

(5) 工业以太网技术将在未来的 3~5 年逐步嵌入低压电器元件与系统中，它将是新一代总线通信技术，主导未来的低压电器通信与控制技术的发展。

第 16 章 低压电器标准

1 我国低压电器标准体系

1.1 概况

我国低压电器标准体系在 20 世纪 80 年代以前是按照前苏联的模式建立的，与国际标准体系有较大的差异，20 世纪 80 年代后随着低压电器技术的发展和积极采用国际标准政策要求，低压电器的标准体系有了较大的发展，逐步形成了国家标准与国际标准（IEC 标准）接轨的标准体系。根据我国产品发展的要求又制定了部分行业标准作为补充，企业根据国家标准、行业标准制定具体的产品标准。

- 低压电器标准体系对应于：
- IEC/SC17B，低压开关设备和控制设备。
- IEC/SC23E，家用断路器及类似装置。
- IEC/SC32B，低压熔断器。
- IEC/TC109，低压系统设备的绝缘配合。

目前，我国低压电器标准共有国标 50 项，行标 40 项；国家标准中，强制性标准 25 项，推荐性标准 25 项；等同采用 IEC 标准 43 项，修改采用国际标准 7 项。

这些标准涉及低压开关设备和控制设备（如低压断路器；开关、隔离器、隔离开关与熔断器组合电器；接触器、起动器、过载继电器；控制电路电器；多功能电器；自动转换开关电器、控制和保护开关电器；接线端子排；模数化组合电器等）；低压熔断器；家用断路器及类似装置（家用和

类似场所用断路器、剩余电流保护断路器、剩余电流动作继电器、移动式剩余电流动作保护器等）；低压系统设备的绝缘配合。

随着我国加入 WTO 及经济、技术全球化的速度加快，标准对提升我国产品在国际上的竞争力，促进国际贸易以及合理保护我国市场等方面起着举足轻重的作用。低压电器行业建立了较为完善的、与 IEC 接轨的技术标准体系。我国低压电器的标准基本满足市场需求，并促进了低压电器产品的发展。这些标准大部分被我国强制认证所采用，通过标准与认证相结合大力推进了标准的实施。

1.2 标准体系框图

我国低压电器现行标准体系见图 2.16-1 和图 2.16-2。

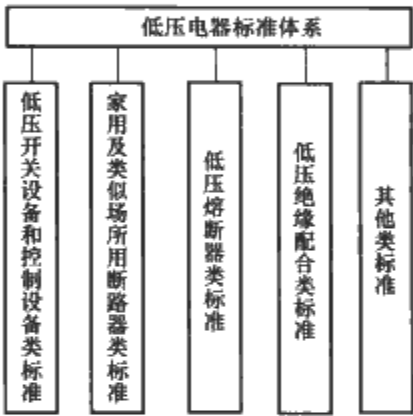
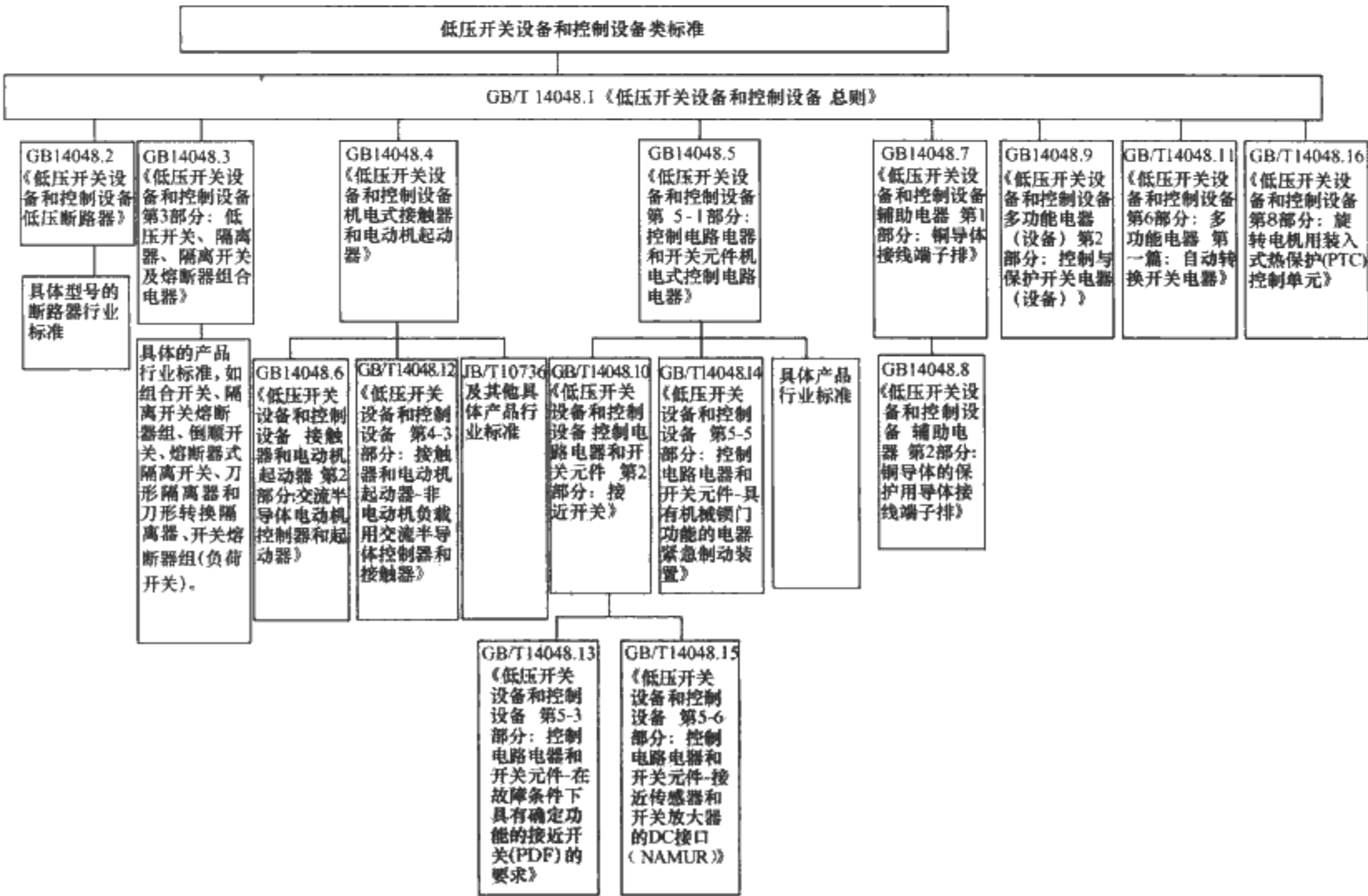
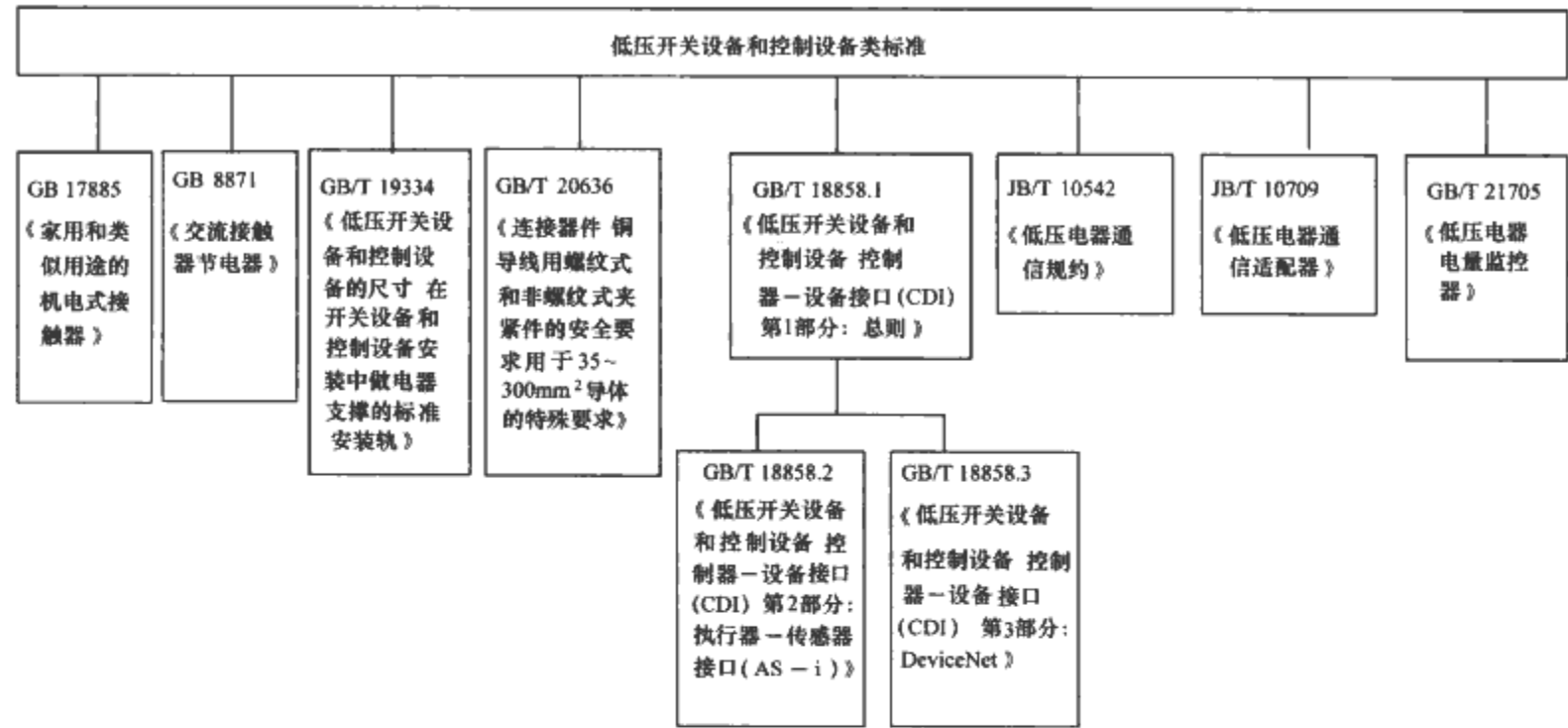


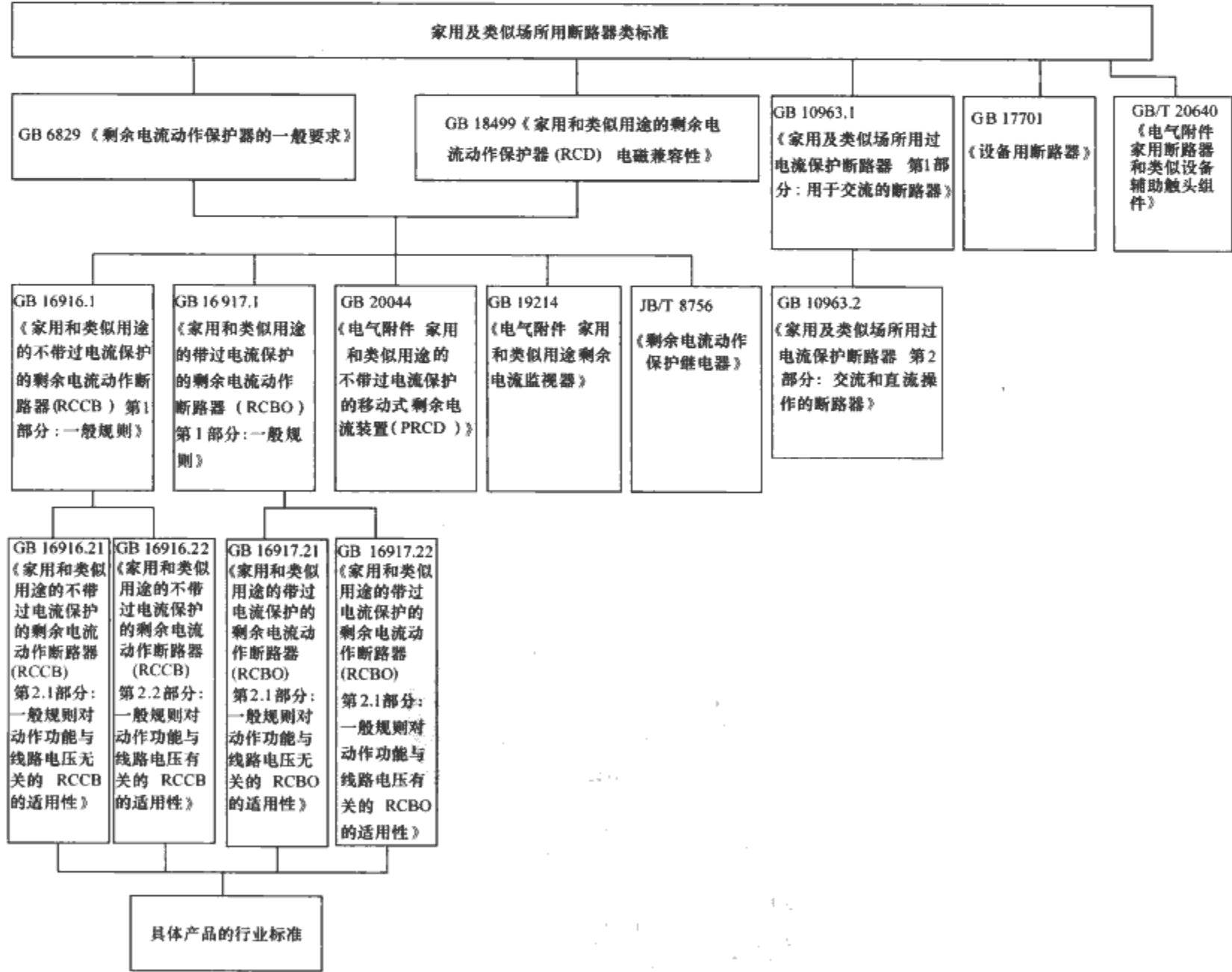
图 2.16-1 低压电器标准体系



(a)



(b)



(c)

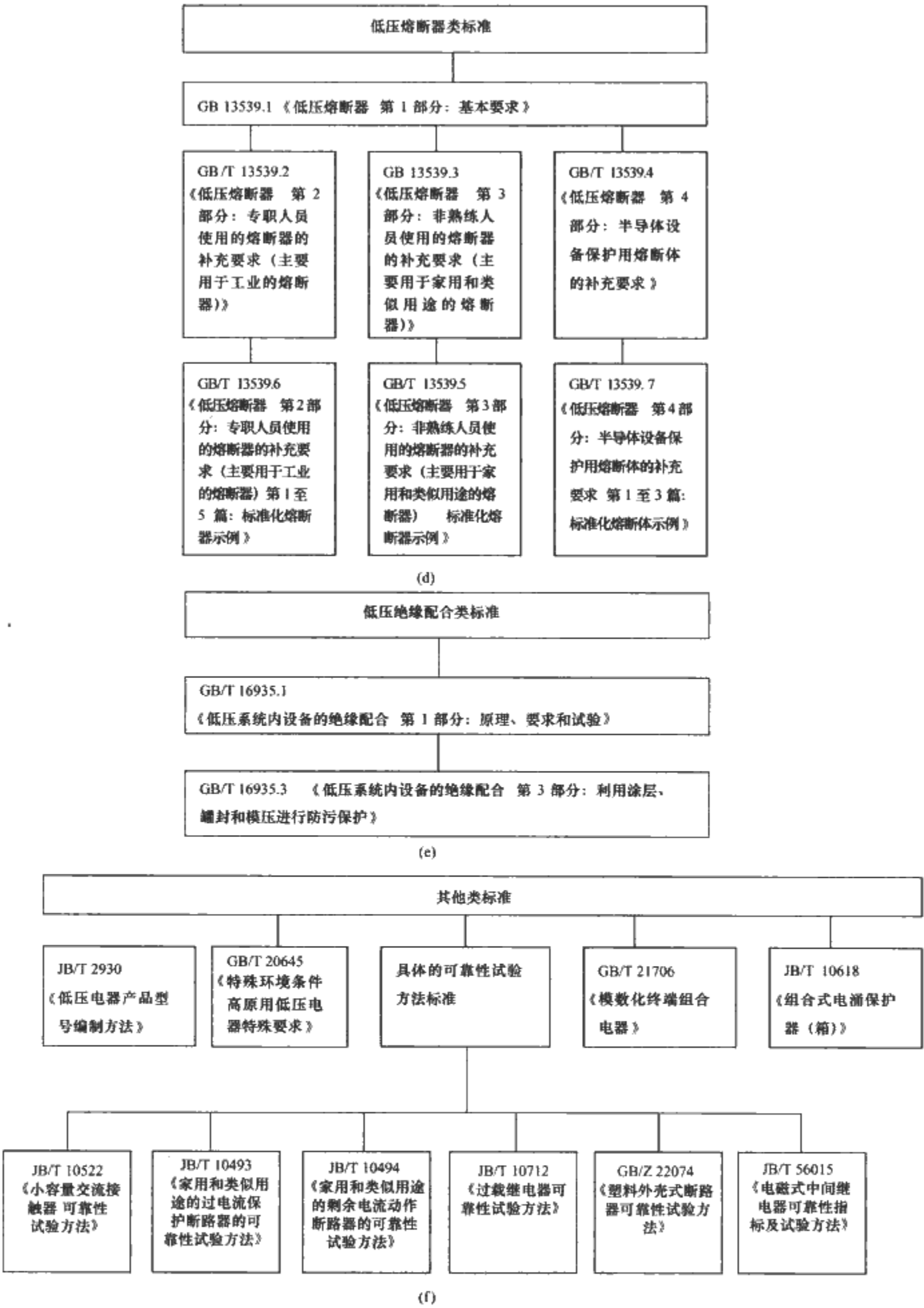


图 2.16-2 我国低压电器现行标准

(a)、(b) 低压开关设备和控制设备类；(c) 家用及类似场所用断路器类；(d) 低压熔断器类；(e) 低压绝缘配合类；(f) 其他类

2 低压电器主要标准介绍

2.1 低压开关设备和控制设备类标准

(1) GB 14048.1《低压开关设备和控制设备 第1部分：总则》。这是GB 14048系列标准中的基础标准，它规定了低压开关设备和控制设备通用的基本要求和试验方法。GB 14048系列标准中的其他部分为产品标准，产品标准中大量引用了本标准中规定的技术要求和试验方法并进行补充，因此产品标准必须与本标准结合使用。

标准适用于低压开关设备和控制设备，包括断路器、低压开关、隔离器、隔离开关、熔断器组合电器、接触器、电动机起动器、接线端子排、自动转换开关电器等。这些电器用于接通、分断额定电压交流不超过1000V或直流不超过1500V的电路。对于我国1140V的电器可参照采用。

标准中规定了电器的结构、材料、动作性能、电气性能及基础试验方法。对于有产品标准的按产品标准的具体规定，对于无产品标准的低压电器应符合GB 14048.1的基本要求。

(2) GB 14048.2《低压开关设备和控制设备 低压断路器》。GB 14048.2 适用于低压电路中的任何额定电流、各种结构型式或各种预定用途的断路器,如塑料外壳式断路器、万能式断路器、真空断路器等。标准规定了断路器在正常工作时的动作及性能、过载情况下的动作和性能、短路情况下的动作和性能以及运行中与其他电器的配合性能(如选择性和后备保护的配合),各项试验所采用的试验方法等内容。标准还规定了带熔断器的断路器的补充要求、用作接地保护的断路器的要求、具有电子式过电流保护的断路器的附加要求(主要对抗扰度试验、干热试验、湿热试验、热冲击试验、射频发射验证等内容的补充规定)、具有剩余电流保护的断路器(CBR)的特性要求及用于IT系统断路器的附加要求等内容。

(3) GB 14048.3《低压开关设备和控制设备 第3部分:低压开关、隔离器、隔离开关及熔断器组合电器》。GB 14048.3 适用低压配电电路和电动机电路中的开关、隔离器、隔离开关、熔断器式开关、隔离器熔断器组、熔断器式隔离器、隔离开关熔断器组、熔断器式隔离开关等电器。规定了电器在正常使用条件下和非正常条件下(如适当过载)的工作状态和性能以及试验方法。对于具有隔离功能的电器作了有关隔离功能的特别规定,如触头间的电气间隙、耐压等级、泄漏电流等要求,其他电器如具有隔离功能的也应符合其要求。

(4) GB 14048.4《低压开关设备和控制设备 机电式接触器和电动机起动器》。GB 14048.4 适用于低压交流和直流接触器以及交流电动机起动器、过载继电器、电动机保护器、软起动器等。主要有:配有过载和(或)短路保护电器的接触器;配有独立的短路保护电器和(或)配有独立的短路保护电器且自身具有过载保护电器的起动器;按规定的条件将接触器或起动器与短路保护电器组装为一个整体,如综合式起动器或保护式起动器。标准规定的交流电动机起动器包括直接(全电压)交流起动器、交流减压起动器(Y- Δ 起动器,两级自耦减压起动器)和转子变阻式起动器。

标准主要规定了接触器和起动器及辅助器件的特性及试验方法。标准中还规定了与接触器和起动器配合使用完成其他保护、控制功能的电器的附加要求。该类电器一般不用于分断短路电流,因此使用时回路中应配有适当的短路保护电器。

(5) GB 14048.5《低压开关设备和控制设备 第5-1部分:控制电路电器和开关元件 机电式控制电路电器》。GB 14048.5 适用于在开关设备和控制设备中作控制、信号、连锁等用途的控制电路电器和开关元件,主要包括下列型式的控制电路电器:人力操作控制开关,如按钮、旋转开关、脚踏开关等;电磁操作控制开关,具有延时或瞬时动作,如接触器式继电器;指示开关,如压力开关、温敏开关(热敏开关)、程控器等;位置开关,如由机器或机械部件操作的控制开关;其他控制电路电器,如指示灯等。同时该标准也适用于与其他电器(其主电路符合其他标准)中的辅助和控制电路用的开关元件,如:开关电器(如接触器、断路器等)中辅助触头,外壳门上的连锁触头,旋转开关中控制电路触头,过载继电器中控制电路触头等。

(6) GB 14048.6《低压开关设备和控制设备 接触器和电动机起动器 第2篇:交流半导体电动机控制器和起动器》。GB 14048.6 适用于可以带有一系列机械式开关电器、连接至电路的额定电压不超过交流1000V的控制器和起动器。标准中规定了在使用时带或不带并联开关电器的控制器

和起动器的特性;在操作性能、介电性能、防护等级、结构要求等方面控制器和起动器应满足的条件;用来验证满足这些条件的试验及所采用的试验方法;标志在产品上或由制造厂提供的资料。本标准还规定了与独立的短路保护电器相配合的控制器和起动器的要求。该类产品包括固态接触器、软起动器(包括旁路式、混合式)等。另外,由于交流半导体控制器和起动器一般不用于分断短路电流,因此,控制器和起动器应与适当的短路保护电器配合使用。

(7) GB 14048.7《低压开关设备和控制设备 辅助电器 第1部分:铜导体接线端子排》、GB 14048.8《低压开关设备和控制设备 辅助电器 第2部分:铜导体的保护用导体接线端子排》。GB 14048.7 主要用于工业或类似用途的安装在支架上为铜导线提供电气连接以及与机械连接的螺纹型或非螺纹型接线端子排,连接截面积为 $0.2\sim 300\text{mm}^2$ (AWG24/600MCM)经过或未经过特殊加工的圆铜导线的接线端子排。对于一些特殊型式的接线端子排(如隔离接线端子排),如果无合适的标准采用,可参照GB 14048.7。

GB 14048.8 主要用于工业用的带螺纹型或非螺纹型夹紧件的保护导体接线端子排,具有PE保护功能的接线端子排不大于 120mm^2 (250MCM),具有PEN保护功能的接线端子排大于或等于 10mm^2 (AWC8)。保护导体接线端子排与GB 14048.7规定的接线端子排通常连在一起使用。

(8) GB 14048.9《低压开关设备和控制设备 多功能电器(设备) 第2部分:控制与保护开关电器(设备)》。该标准中主要规定了控制与保护开关电器(设备)(CPS)通用的基本要求和试验方法,CPS是一种集断路器、接触器、过载继电器功能为一体的新型多功能电器,CPS的主要特征是在同一单元的产品上实现集成化的、内部协调配合的控制与保护功能,能够替代由断路器(熔断器)、接触器、过载(或过流、断相)保护继电器、起动器、隔离器等多种传统的分立元器件组成的系统功能,具有远距离自动控制和就地直接人力控制功能,以及协调配合的时间-电流特性,可实现对一般的电动机负载、频繁起动的电动机负载、配电电路负载的控制与保护。

(9) GB/T 14048.10《低压开关设备和控制设备 控制电路电器和开关元件 第2部分:接近开关》。GB/T 14048.10 适用于能检测金属的和(或)非金属的物体存在与否的电感式和电容式接近开关、能检测反射声音物体存在与否的超声波式接近开关、能检测物体存在与否的光电式接近开关。该接近开关是全封闭式,并且具有半导体开关元件,可用于连接额定电压交流不超过250V(50Hz或60Hz),或直流不超过300V的电路。标准对接近开关的动作距离、检测范围、重复精度、回差、操作频率等特有的性能进行了规定,并给出相应试验验证方法。该标准不适用于具有模拟量输出的接近开关。

(10) GB/T 14048.11《低压开关设备和控制设备 第6部分:多功能电器 第1篇 自动转换开关电器》。自动转换开关电器(ATSE)主要用于两路低压电源的转换,在转换电源期间中断向负载供电。标准中规定了电器的预定操作、在规定的非正常条件(如短路)下的操作特性、介电性能及验证试验方法。标准中要求CB级的ATSE需配备过电流脱扣器,其主触头能够接通和分断短路电流;PC级的ATES应能够接通、承载,但不能分断短路电流。

(11) GB 17885《家用及类似用途机电式接触器》。这是一份适用于家用及类似用途的机电式接触器的标准,本标准的接触器不同于GB 14048.4中规定的接触器,主要体现

在额定电压范围及产品的使用类别上。该标准中的接触器主触头用于连接额定电压不超过交流 440V、使用类别 AC-7a (家用电器和类似用途的低感负载) 下额定工作电流小于或等于 63A 和使用类别 AC-7b (家用的电动机负载) 下额定工作电流小于或等于 32A、额定限制短路电流小于或等于 6kA 的电路。

(12) GB/T 19334《低压开关设备和控制设备的尺寸在开关设备和控制设备安装中做电器机械支撑的标准安装轨》。该标准涉及的内容是在开关设备和控制设备中, 将各种电器装置共同安装在一起的某些型式的安装轨。安装轨的基本功能要求是足以支撑电气设备, 应有足够的机械强度和刚性以保证承受设备的静、动负载。标准中对“TH”型、“C”型、“G”型截面安装轨的尺寸和功能要求进行了规定, 给出了安装轨和固定在轨上电器所应遵循的相关尺寸。同时标准的附录中提供了满足本标准要求的专用的钢安装轨的附加尺寸数据和应用于这些轨的负载要求。

(13) GB/T 18858.1《低压开关设备和控制设备 控制器—设备接口 (CDI) 第 1 部分: 总则》, GB/T 18858.2《低压开关设备和控制设备 控制器—设备接口 (CDI) 第 2 部分: 执行器—传感器接口 (AS-i)》, GB/T 18858.3《低压开关设备和控制设备控制器—设备接口 (CDI) 第 3 部分: DeviceNet》。

以上三份标准均涉及低压开关设备和控制设备与控制器 (如可编程控制器、个人计算机等) 之间的接口 (CDI)。GB/T 18858.1 中规定了适用于工业 CDI 的定义规则、元件及基本性能要求 (如过程、信息交换、结构和协议等)。有关各类 CDI 的标准特性也作为基本要求集中列入该标准中。GB/T 18858.2 描述了一个面向位的单个控制电路设备和开关元件之间的接口系统, 开关元件连接到无屏蔽、非双绞线电缆上, 并传输数据和电源; 标准中建立了一个带有此接口的元件的可互换性体系, 规定了从站、主站和机电设备之间的接口要求; 从站、机电设备和主站的正常使用条件; 结构和性能要求; 验证符合各种要求的试验等内容。GB/T 18858.3 中描述了单个或多个控制器与控制回路设备或开关元件间的一种接口系统 (DeviceNet) 的技术要求, 该接口系统使用在同一根电缆内的两对双绞屏蔽线 (一对导线提供差动通信介质, 另一对导线提供设备电源), 标准中规定了有关 DeviceNet 的控制器和开关元件间的接口要求, 设备的正常工作条件、结构和性能要求、认证测试要求等内容。GB/T 18858.2 和 GB/T 18858.3 均需与 GB/T 18858.1 配合使用, 即在确定各种 CDI 的全部要求和试验时, 除了满足 GB/T 18858.1 的共性要求之外, 还应满足相应的 CDI 专用标准, 但是专用标准的内容不应违背其基本要求, 除非确有充分的技术理由。

(14) JB/T 10542《低压电器通信规约》。该标准适用于低压电器和现场总线之间的通信, 采用本标准的低压电器可直接或通过通信适配器与 Modbus、DeviceNet、Profibus-DP 等现场总线系统通信。

JB/T 10542 标准以我国向 DeviceNet 国际用户组织提交的断路器描述为基础, 吸收了国外大公司和国际现场总线行规, 选取各自的优点, 结合中国实际应用情况, 制定为低压电器通信规约, 以规范可通信低压电器的描述。

JB/T 10542 标准对低压电器通信的共性技术作了规定, 包括: 通信中的系统拓扑方式、现场总线的类型、通信数据、低压电器的数据交换接口形式、使用通信适配器来连接上层现场总线系统、检测的要求、工业规范和版本号、工业

运行软件环境等。

该标准附录还对具体的低压电器产品作了描述, 包括数据通信参数表、通信细则和参数定义; 其中数据通信参数表中规定了参数项、数据类型、单位、访问规则、地址、属性、支持该参数的设备代号等。

(15) JB/T 10709《低压电器通信适配器》。大部分低压电器产品是通过通信适配器与不同现场总线进行通信的, 标准中列举了主要是通过 Modbus—DeviceNet 通信协议转换器接入 DeviceNet 总线的设备的技术参数、性能要求及试验方法等。DeviceNet—Modbus 适配器用于将具有 Modbus 接口的低压设备接入 DeviceNet 总线, 它向下通过 Modbus 协议, RS-485 串行接口与断路器等设备连接, 向上通过 DeviceNet 接口接入 DeviceNet 总线。通过对设备数据的合理安排和协议的转换, 使通常的带 Modbus 接口的设备采集的数据可以传给 DeviceNet 主站, 将 DeviceNet 主站的命令下传给设备, 并满足 DeviceNet 网络的基本要求。

2.2 家用及类似场所用断路器类标准

(1) GB 6829《剩余电流动作保护器的一般要求》。这是剩余电流动作保护器的基础标准, 标准规定了剩余电流动作保护器的一般要求。包括特征、正常工作条件、结构和性能要求、特性和性能验证以及标志的要求。

标准适用于交流额定电压至 380V、额定电流至 200A 的剩余电流动作保护器 (以下简称剩余电流保护器)。该剩余电流保护器主要功能是对有致命危险的人身触电提供间接接触保护。额定剩余动作电流不超过 0.03A 的剩余电流保护器在其他保护措施失效时, 也可作为直接接触的补充保护, 但不能作为唯一的直接接触保护。剩余电流保护器还可防止由于接地故障电流引起的电气火灾。

剩余电流保护器是指具有检测剩余电流, 将剩余电流与基准值相比较, 以及当剩余电流超过基准值时断开被保护电路等三个功能的装置 (如剩余电流断路器) 或组合装置 (如由剩余电流继电器与低压断路器或低压接触器组成的剩余电流保护器)。对只能完成上述两个功能而不能断开被保护电路的电器 (如剩余电流继电器和剩余电流报警装置等), 除了必须补充技术要求外, 可采用本标准有关的基本要求。对于额定电压大于 380V 但不超过 1200V, 额定电流超过 200A 的剩余电流保护器也可采用本标准规定的基本要求。

对于已有国家标准对应的产品, 应采用相关国家标准, 无国家标准对应的产品应符合本标准的要求。如家用和类似用途的不带过电流保护的剩余电流动作断路器 (RCCB) 应按 GB 16916 标准的规定。

(2) GB 10963 标准共 2 个部分, GB 10963.1 为《家用及类似场所用过电流保护断路器 第 1 部分: 用于交流的断路器》, GB 10963.2《家用及类似场所用过电流保护断路器 第 2 部分: 交流和直流操作的断路器》。

GB 10963 所涵盖的家用小型断路器与 GB 14048.2 所涵盖的工业装置用断路器功能是一样的, 但适用范围完全不同。GB 10963 所涵盖的家用小型断路器主要适用于额定电压 440V 及以下、额定电流 125A 及以下、过电压类别 III、污染等级 2 的场所, 供非专业人员使用, 无需维修, 具有隔离功能, 额定短路分断能力不超过 25 000A; GB 14048.2 所涵盖的工业装置用断路器主要适用于额定电压交流 1000V 直流 1500V 及以下、额定电流为 6~6300A、过电压类别 III 和 IV、污染等级 3 的场所, 供专业人员使用, 可维修, 额定短路分断能力较大。

GB 10963.1 所涵盖的家用小型断路器的主要性能包括电击保护、介电性能和隔离能力、脱扣特性、短路能力等。断路器在按正常使用条件安装和接线后,带电部件是不易触及的。断路器应具有足够的介电性能并应确保隔离。断路器的脱扣特性应对电路有足够的保护,而无过早的动作。断路器应具有规定的短路操作次数,在短路操作时不应危及操作者,也不应在带电导电部件之间或带电导电部件与地之间产生闪络。

GB 10963.2 规定了适用于在直流电路中运行的单极和双极断路器的补充技术要求。单极断路器额定直流电压不超过 220V,双极不超过 440V,额定电流不超过 125A,额定直流短路能力不超过 10 000A。它是一种既能接通分断交流电流又能接通和分断直流电流的断路器。因此,对于交流部分的性能应满足 GB 10963.1 的要求,直流部分的性能对于脱扣特性、短路电流下的性能作补充规定。对于 B 型断路器,除了对各极通以交流电流外,还要通以 $4I_N$ 和 $7I_N$ 的直流电流,断路器应在 0.1s 内脱扣;对于 C 型断路器,除了对各极通以交流电流,还要通以 $7I_N$ 和 $15I_N$ 的直流电流,断路器应在 0.1s 内脱扣。

(3) GB 17701《设备用断路器》。设备用断路器是指适用于对电气设备内部的线路提供保护的断路器(CBE),标准适用于额定电压不超过交流 440V 和/或直流 250V、额定电流不超过 125A 的产品。设备用断路器可具有比过载条件要求高的额定短路能力,此外还可具有一个与规定的短路保护装置(SCPD)相关的限制短路电流值。设备用断路器与规定的 SCPD 电器连接时,应能承受由于短路电流造成的应力而无构成危及操作者或设备的现象,如火焰、火花或热游离气体。

GB 17701 标准包括自动分断无自动再扣的设备用断路器(R 型设备用断路器)和手动开闭操作的设备用断路器(M、S 型设备用断路器)。

(4) GB 16916 标准共三个部分,GB 16916.1 为一般规则,GB 16916.21 为一般规则对动作功能与线路电压无关的 RCCB 的适用性,GB 16916.22 为一般规则对动作功能与线路电压有关的 RCCB 的适用性。

RCCB 适用于交流额定电压不超过 440V,额定电流不超过 125A,主要作用为电击危险保护,可用于对人的间接接触保护,也可用来对由于过电流保护装置不动作而持续存在的接地故障电流引起的火灾危险提供保护。额定剩余动作电流不超过 30mA 的 RCCB 也可作为其他电击保护措施失效时的补充保护措施。对动作功能与线路电压无关的 RCCB 和动作功能与线路电压有关的 RCCB 适用性作了补充规定。

RCCB 是不带过电流保护的剩余电流断路器,GB 16916.1 对 RCCB 规定了 5 项短路试验项目,包括额定接通和分断能力 I_m 、额定剩余接通和分断能力 $I_{\Delta m}$,与短路保护电器(SCPD)配合时的额定限制短路电流 I_{Nc} 、额定接通和分断能力 I_m 、额定限制剩余短路电流 $I_{\Delta c}$;为验证浪涌电流作用下防误动作性能,除了 200A 振铃波试验以外,要求对所有的 RCCB 进行 3000A、8/20 μ s 的浪涌电流试验。在试验过程中一般型 RCCB 可以脱扣,S 型 RCCB 不允许脱扣。

(5) GB 16917 标准共分三个部分,GB 16917.1 为一般规则,GB 16917.21 为一般规则对动作功能与线路电压无关的 RCBO 的适用性,GB 16917.22 为一般规则对动作功能与线路电压有关的 RCBO 的适用性。

RCBO 适用于交流 50Hz 或 60Hz、额定电压不超过 440V、额定电流不超过 125A、额定短路能力不超过 25

000A、动作功能与电源电压无关或与电源电压有关的家用或类似用途的带过电流保护的剩余电流动作断路器。RCBO 用来对人进行间接接触保护,这时设备的外露导电部件应接到一个合适的接地极上。RCBO 还可用来对建筑物及类似用途的线路设备进行过电流保护,也可对由于过电流保护装置不动作而持续存在的接地故障电流引起的火灾危险提供保护。额定剩余动作电流不超过 30mA 的 RCBO 也可作为其他电击保护措施失效时的补充保护措施。RCBO 除了适用于整体式的带过电流保护的剩余电流断路器之外,也适用于由剩余电流装置(RCD 元件)与家用断路器(MCB)组装而成的 RCBO,机械装配可由制造厂在工厂完成或在现场进行,这种情况下 RCD 元件和 MCB 及其组装应符合 GB 16917.1—2003 中附录 G 的要求。

(6) GB 18499《家用和类似用途的剩余电流动作保护器(RCD)电磁兼容性》。本标准是用来确保主要用作保护人体防止电击的剩余电流保护装置的电磁兼容性(EMC)。对于家用和类似用途的剩余电流动作保护器(RCD),规定了一定的电磁条件和电磁兼容性能,其中包括对低频电磁现象、高频电磁现象、静电放电的电磁抗扰度、RCD 的电磁发射限值等。

RCD 通常不会产生连续的或瞬变的骚扰,在开闭过程中发射的频率、电平和影响可看作是低压设备正常电磁环境的一部分。RCD 的电磁抗扰度性能判别准则按 GB/T 17626《电磁兼容 试验和测量技术》进行。

(7) GB 19214《电气附件 家用和类似用途剩余电流监视器》。本标准适用于额定电压不超过交流 440V、额定电流不超过 125A 的家用和类似用途的剩余电流监视器(RCM)。RCM 是用来监视设备中的剩余电流,在带电部件与外露的导电部件或地之间的剩余电流超过预定值时发出报警信号。RCM 应能检测突然施加的或缓慢上升的交流剩余电流和脉动直流剩余电流。RCM 可用在供电连续性要求较高或不能立即断开电源的线路中,发生接地故障时不断开电路,而是发出报警信号。RCM 也可用在 IT 系统中,监视电路中的接地故障电流,避免二次接地故障的接地电弧引起火灾或爆炸的危险。

(8) GB 20044《电气附件 家用和类似用途的不带过电流保护的移动式剩余电流装置(PRCD)》。PRCD 由一个插头、一个剩余电流装置(RCD)和一个或几个插座或接线器件组成,其动作功能与电源电压有关或与电源电压无关(即通常所称的电子式和电磁式两种型式)。PRCD 不带过电流保护,适用于对地额定电压不超过交流 250V、额定电流不超过 16A 的单相电路。除了固定装置提供的保护以外,PRCD 用来对其下端的电路提供直接接触的电击危险保护。PRCD 的额定剩余动作电流不超过 0.03A,当剩余电流值超过设定值时断开被保护电路。PRCD 不能用来作为固定装置的一部分使用,他们的连接装置可以是插头、插座、接线端子或电缆等。

(9) JB/T 8756《剩余电流动作保护继电器》。本标准适用于交流 50Hz、额定电压至 400V、额定电流至 2500A 的变压器中性点直接接地的配电线路中使用的,用来检测线路中接地故障电流的剩余电流继电器。

剩余电流继电器当剩余电流超过基准值时,发出一个机械开闭信号。包括检测部分和控制部分可以为一体的整体式剩余电流继电器,以及检测部分和控制部分分开安装的分体式剩余电流继电器。剩余电流继电器可与低压断路器或低压接触器组装成组合式的剩余电流保护器,可以用来对线路进

行接地故障保护,防止由于接地故障电流引起的设备事故或电气火灾,也可用来对人身触电危险提供间接接触保护。剩余电流继电器可以有一个专门用来指示剩余电流动作的指示装置,剩余电流继电器只有在使剩余电流指示装置复位后才能重新闭合。

2.3 低压熔断器类标准

(1) GB 13539.1《低压熔断器 第1部分:基本要求》。低压熔断器标准规定了封闭式限流熔断体的熔断器的性能要求,其额定分断能力不小于6kA。熔断器用于保护交流至1000V直流至1500V的电路。标准规定了熔断器的基本要求和试验方法。特别对“gG”和“gM”熔断体规定了详细的动作特性,如约定时间和约定电流(额定电流16A及以上的熔断体约定不熔断电流 I_{nt} 为 $1.25I_N$,约定熔断电流 I_f 为 $1.6I_N$)、门限、g熔断体的额定电流验证、约定电缆的过载保护(仅对“gG”熔断体)以及“gG”和“gM”熔断体0.01s时的弧前 I^2t 值。产品标准中大量引用了本标准中规定的技术要求和试验方法,因此产品标准必须与本标准结合使用。

(2) GB/T 13539.2《低压熔断器 第2部分:专职人员使用的熔断器的补充要求(主要用于工业的熔断器)》。适用于专职人员使用的熔断器,用在只有专职人员才能接近以及更换熔断体的装置中。除了应符合GB 13539.1所有要求,也应符合规定的补充要求。其中包括:最小额定分断能力(交流额定电压690V及以下的熔断器为50kA,直流额定电压750V及以下的熔断器为25kA)、“aM”熔断体6挡门限值($4I_N$, $6.3I_N$, $8I_N$, $10I_N$, $12.5I_N$, $19I_N$)及“aM”熔断体的最大熔断 I^2t 值。

由于具体型式的熔断器要求在GB 13539.6中规定,所以本标准在使用时应与GB 13539.1和GB/T 13539.6一起使用。

(3) GB 13539.3《低压熔断器 第3部分:非熟练人员使用的熔断器的补充要求(主要用于家用和类似用途的熔断器)》。适用于非熟练人员使用的熔断器。该熔断器为额定电流不超过100A、额定电压不超过交流500V的“gG”熔断器,除了符合GB 13539.1所有要求,熔断器也应符合本标准规定的补充要求。其中包括最小额定分断能力,熔断器额定电压小于240V时为6kA,240V及以上为20kA;非互换性,即熔断体不会因疏忽而被其他额定电流大于预定值的熔断体所取代;防电击保护,熔断器在正常使用条件下的防护等级至少为IP2X;温升值,接线端子的温升一律为65K。

由于具体型式熔断器的要求在GB/T 13539.5中规定,所以本标准在使用时应与GB 13539.1和GB/T 13539.5一起使用。

(4) GB/T 13539.4《低压熔断器 第4部分:半导体设备保护用熔断体的补充要求》。适用于安装在具有半导体装置的设备上的熔断体,熔断体的额定电压不超过交流1000V或标称电压不超过直流1500V,还可以用于更高的标称电压的电路。熔断体应符合GB 13539.1的所有要求,还应符合本部分规定的补充要求。其中包括:熔断体在50%~100%额定电流的耗散功率、约定时间和约定电流(“gR”和“gS”约定熔断电流 I_f 为 $1.6I_N$,约定不熔断电流 I_{nt} ,“gR”为 $1.1I_N$,“gS”为 $1.25I_N$)、额定分断能力(标准推荐交流至少50kA、直流至少8kA)、电弧电压特性,制造厂提供的电弧电压特性给出熔断体所在电路的外加电压为函数的电弧电压最大值。

由于具体型式的熔断体的要求在GB/T 13539.7中规定,所以本标准在使用时应与GB 13539.1和GB/T 13539.7一起使用。

(5) GB/T 13539.5《低压熔断器 第3部分:非熟练人员使用的熔断器的补充要求(主要用于家用和类似用途的熔断器) 标准化熔断器示例》。这是GB 13539系列标准的第5部分,是非熟练人员使用的熔断器的举例,标准分为如下6章:

- 第1章: D型熔断器。
- 第2章: A型圆管式熔断器。
- 第3章: B型圆管式熔断器。
- 第4章: C型圆管式熔断器。
- 第5章: 插脚式熔断器。
- 第6章: 主要用在插脚的圆管式熔断器。

标准具体规定了上述各熔断器的尺寸,补充了门限、约定时间和约定电流、时间—电流曲线、试验等内容。这些熔断器应符合GB 13539.1和GB 13539.3要求,也应符合本标准规定的补充要求。所以本标准应与GB 13539.1和GB 13539.3一起使用。

(6) GB/T 13539.6《低压熔断器 第2部分:专职人员使用的熔断器的补充要求(主要用于工业的熔断器) 第1至5篇: 标准化熔断器示例》。这是GB 13539系列标准的第6部分,是专职人员使用的熔断器的举例,标准分为如下5篇:

- 第1篇: 刀型触头熔断器。
- 第1A篇: 带撞击器的刀型触头熔断器。
- 第2篇: 螺栓连接熔断器。
- 第3篇: 圆筒形帽熔断器。
- 第4篇: 偏置触刀熔断器。
- 第5篇: “gD”和“gN”特性熔断器。

标准具体规定了上述各熔断器的尺寸,补充了时间—电流曲线、熔断体的额定耗散功率和熔断器支持件的额定接受功率、 I^2t 特性及试验等内容。这些熔断器应符合GB 13539.1和GB/T 13539.2要求,也应符合本标准规定的补充要求。所以本标准应与GB 13539.1和GB/T 13539.2一起使用。

(7) GB/T 13539.7《低压熔断器 第4部分:半导体设备保护用熔断体的补充要求 第1至3篇: 标准化熔断体示例》。这是GB 13539系列标准的第7部分,是半导体设备保护用熔断体的举例。标准分为如下3篇:

- 第1篇: 螺栓连接熔断体(包括A型、B型、C型)。
- 第2篇: 接触片式熔断体(包括A型、B型)。
- 第3篇: 圆筒形帽熔断体(包括A型)。

由于标准只规定了尺寸,而没有规定标准特性,所以在使用时应与GB 13539.1和GB/T 13539.4一起使用。

2.4 低压绝缘配合类标准

(1) GB/T 16935.1《低压系统内设备的绝缘配合 第1部分:原理、要求和试验》。GB/T 16935系列标准是电气基础安全标准,用于指导有关专业标准对其所涉及的各种设备合理地制定相关要求,从而达到绝缘配合的要求。

标准规定了低压系统中设备应根据设备的性能要求,确定设备的电气间隙、爬电距离和固体绝缘。为各专业标准确定设备在空气中电气间隙、爬电距离和固体绝缘时提供了必要的指导。标准提供了不同情况下最小的电气间隙、爬电距离值。

电气间隙确定原则:

- 1) 冲击耐受电压 (根据设备额定电压和过电压类别而定)。
- 2) 电场条件 (均匀电场和非均匀电场)。
- 3) 微观环境中的污染等级。
- 4) 海拔 (超过 2000m 以上的电气间隙应乘以海拔修正系数)。

爬电距离确定原则:

- 1) 电压 (实际工作电压、额定绝缘电压或额定电压) 及电压作用时间。
- 2) 微观环境中的污染等级。
- 3) 绝缘材料性能 (CTI 值等特性) 和绝缘表面的形状。
- 4) 爬电距离的方向和位置 (设备和元件预期使用的方位)。

(2) GB/T 16935.3《低压系统内设备的绝缘配合 第3部分:利用涂层、罐封和模压进行防污保护》。对于利用涂层、罐封和模压进行防污保护的组件,其电气间隙和爬电距离可以小于 GB/T 16935.1 或 IEC 60664-5《低压系统内设备的绝缘配合 第5部分:不超过 2mm 的电气间隙和爬电距离的确定方法》中规定的电气间隙和爬电距离。

标准规定了两种保护型式的要求和试验程序:

- 1) 1 型保护。该类保护用于改善被保护组件的微观环境。在该类保护型式下,污染等级为 1 级。
- 2) 2 型保护。该类保护类似于固体绝缘。在该类保护型式下,导电件保护材料和印制电路板之间不存在气隙。

标准也适用于各种类型的被保护印制板,包括多层印制板的内层表面、基板和类似的被保护组件。对于多层印制板,内层距离的相关要求包含在 GB/T 16935.1 的固体绝缘要求中。

标准仅涉及永久性保护,不适用于可进行机械调节和修理的组件。

2.5 其他类标准

2.5.1 可靠性标准

(1) JB/T 56015《电磁式中间继电器可靠性指标及试验方法》。标准中规定了电磁式中间继电器的可靠性指标及可靠性试验的要求和方法。电磁式中间继电器采用失效率 (λ) 为其可靠性特征量,按其最大失效率的数值分为亚五级、五级、亚六级、六级和七级等 5 个失效率等级。继电器可靠性试验主要检测继电器的触头能否正常地工作,即继电器的触头在每次操作的闭合期内是否可靠地闭合,在断开期内是否可靠地断开。为此,标准规定了失效判据、试验的抽样方案和试验程序,并对试验装置提出了相应的要求。

(2) JB/T 10522《小容量交流接触器 可靠性试验方法》。该标准中规定了小容量交流接触器的可靠性验证试验的一般要求和方法。标准适用于交流 50Hz 或 60Hz,主电路额定工作电流 50A 及以下,额定控制电源电压从 24~400V,其寿命能合理地认为是服从指数分布的交流接触器 (以下简称接触器) 的可靠性验证试验。主电路额定工作电流 50A 以上的接触器的可靠性验证试验也可参照本标准。小容量交流接触器采用失效率 (λ) 为其可靠性特征量,并按其最大失效率的数值分为 5 个失效率等级作为产品的可靠性指标。小容量交流接触器可靠性试验主要是检测产品的操作可靠性和主触点、辅助触点的闭合、断开可靠性。标准规定了失效判据,试验的抽样方案和试验程序,并对试验装置提出了相应的要求。

(3) JB/T 10493《家用和类似用途的过电流保护断路器的可靠性试验方法》。该标准中规定了家用和类似用途的过电流保护断路器进行可靠性试验的一般要求。适用于符合 GB 10963《家用及类似场所用过电流保护断路器》规定的产品,即交流 50Hz 或 60Hz,额定电压 440V (相间) 及以下,额定电流 125A 及以下的家用和类似用途的过电流保护断路器。标准中采用操作失效率和瞬动保护成功率作为家用和类似用途的过电流保护断路器的可靠性特征量,成为产品的可靠性指标。操作失效率表示产品在操作中发生故障的概率,瞬动保护成功率表示产品在规定过电流情况下,是否成功脱扣的概率。标准中分为操作可靠性试验和瞬动可靠性试验两个部分,分别对产品的准备、检测、失效判据及验证试验程序等进行规定和要求。本标准可作为制造厂制订家用和类似用途的过电流断路器可靠性指标及试验方法的指导性文件。

(4) JB/T 10494《家用和类似用途的剩余电流动作断路器的可靠性试验方法》。该标准规定了家用和类似用途的剩余电流动作断路器进行可靠性试验的一般要求,适用于符合 GB 16916 或 GB 16917 标准规定的产品。其中符合 GB 16916.1 的 RCCB 采用操作失效率和剩余电流保护成功率作为可靠性特征量;符合 GB 16917.1 的 RCBO 采用操作失效率、剩余电流保护成功率、瞬动保护成功率作为可靠性特征量作为产品的可靠性指标。操作失效率反映产品在操作中发生故障的概率,剩余电流保护成功率表示产品在规定剩余电流情况下,是否成功脱扣的概率。瞬动保护成功率 (只对 RCBO) 反映在规定的过电流 (按 GB 16917.1) 下是否成功脱扣的概率。标准中分为剩余电流保护可靠性试验、操作可靠性试验和瞬动可靠性试验 (只针对 RCBO) 分别对产品的准备、检测、失效判据及验证试验程序等进行规定和要求。本标准可作为制造厂制订家用和类似用途的剩余电流动作断路器可靠性指标及试验方法的指导性文件。符合 GB 14048.2 等标准的剩余电流断路器的可靠性等级及试验方法也可以参照标准的有关内容。

(5) JB/T 10712《过载继电器可靠性试验方法》。该标准规定了过载继电器进行可靠性验证试验的一般要求。过载继电器采用保护成功率 (R) 作为其可靠性特征量,并将保护成功率等级作为其可靠性指标。过载继电器进行可靠性指标和试验主要是衡量、验证和考核产品在规定的过载电流情况下,是否成功脱扣的概率。标准中规定产品在进行可靠性验证试验时,试品应从稳定的工艺条件下批量生产的并经过出厂检验合格的产品中随机抽取,JB/T 10712 标准列举了失效判据的情况 (如脱扣时间、手动/自动复位时间极限值等)、对试验装置的要求 (如逐次监测、能进行程序控制等),并规定了可靠性验证抽样方案。标准适用于符合 GB 14048.4 或 GB 14048.6 标准规定的产品,可作为制造厂制订过载继电器可靠性指标及试验方法的指导性文件。

(6) GB/Z 22074《塑料外壳式断路器可靠性试验方法》。该标准规定了塑料外壳式断路器 (简称塑壳断路器) 进行可靠性验证试验的一般要求。标准适用于符合 GB 14048.2、交流 50Hz (60Hz)、额定电压不超过 1000V、额定电流 250A 及以下的塑壳断路器。本标准主要规定了塑料外壳式断路器操作失效率和保护成功率的可靠性试验方法,包括操作失效率等级和保护成功率等级的划分,相应的失效判据及可靠性验证试验方案的确定等内容。标准中规定塑壳断路器采用操作失效率、瞬动保护成功率和过载保护成功率

作为其可靠性特征量,塑壳断路器可靠性试验由操作失效率验证试验、瞬动保护成功率验证试验和过载保护成功率验证试验三部分组成。其操作失效率试验主要是验证产品操作中发生故障的概率,瞬动保护成功率试验主要是验证产品在规定的试验电流情况下,是否在规定时间内成功脱扣的概率。过载保护成功率试验主要是验证产品在规定的约定脱扣电流情况下是否成功脱扣的概率。额定电流 250A 以上的塑壳断路器的可靠性试验可参照本标准进行。

2.5.2 特殊环境类标准

GB/T20645《特殊环境条件高原用低压电器技术要求》

目前我国低压电器现行的各类标准和 IEC 标准等均适用于海拔 2000m 及以下地区。本标准是在现行低压电器标准基础上,考虑海拔 2000m 以上高原环境条件对低压电器的影响,提出低压电器产品的补充技术要求和试验方法。标准规定了高原环境下低压电器共有的补充技术要求,适用于安装在海拔 2000~5000m 的低压电器。标准中主要对低压电器产品受海拔影响较大的性能指标如温升、介电强度、接通和分断能力、产品动作性能的影响、电寿命等技术内容进行规定和要求,并给出了相应的试验方法。标准同时也在高原电器产品的标识、外壳材料的选用、运输和包装等方面进行了规定,以满足用户和设计者的需求。

2.5.3 其他相关标准

(1) GB/T 21706《模数化终端组合电器》。模数化是指使卡装式电器的外形、安装和连接尺寸全部或部分符合规定的尺寸系列的要求。模数化终端组合电器主要用于电力线路末端,由模数化电器以及它们之间的电气、机械连接和外壳等构成的组合体。该标准适用于交流 50Hz、额定电压至 400V 各种预定用途的模数化组合电器,其进线开关的额定电流不超过 125A。该标准中规定了最常用的模数化终端(用户)组合电器的分类(按安装形式、外壳材料、外壳防护等级、最大安装单元数分类)、结构和性能要求(耐湿、耐热、耐非正常热和火、抗锈、CTI、保护电流连续性等),以及相应的试验方法和检验规则、产品标志等内容。该组合电器可作为用户配电及线路的过载、短路、漏电和过压保护。

(2) JB/T 10618《组合式电涌保护器(箱)》。组合式电涌保护器(箱)由一个或多个用来限制电涌电压和泄放电涌电流的非线性元件或电涌保护器和与之相关的测量、信号、保护等装置以及外壳通过电气、机械连接而构成的组合体。该电器在户内使用,对雷电电涌和其他瞬时过电压的电涌进行限制。标准中主要规定了组合式电涌保护器(箱)的分类(按端口、用途)、性能特性(I 级冲击电流试验、II 级标称放电电流试验、III 级复合波试验、电压保护水平、盲点测试等)以及相应的试验方法和检验规则。

(3) JB/T 2930《低压电器产品型号编制方法》。产品的型号是识别和选择低压电器产品品种与规格的基本标识。低压电器产品型号的标准化和注册管理对于低压电器产品的生产使用、配套工作和维修都具有重要作用。生产企业为增强产品的市场占有率和竞争力,保护企业自身利益和知识产权,可提出与企业名称、商标等相关联的企业产品型号,并申请登记,登记的型号应具有唯一性。

本标准适用于交流额定电压 1000V 及以下、直流额定电压 1500V 及以下的低压电器。该标准中规定了低压电器产品型号编制方法及型号登记办法,产品型号可以使用行业型号或企业专用型号。

3 低压电器标准化发展

3.1 低压电器标准修订趋势

3.1.1 低压开关设备和控制设备类标准

(1) GB 14048.1《低压开关设备和控制设备 第1部分:总则》中将增加附录(资料性)“操作或调节过程中的易近部件”;此附录主要阐明了在介电试验中用于电气保护的金属丝网应放置在何处的问题;增加附录(规范性)“电子过载继电器中的扩展功能”;增加附录(规范性)“数字输入和输出”;此附录主要规定了含有数字输入和/或输出的开关设备和控制设备的要求。

(2) GB 14048.2《低压开关设备和控制设备 第2部分:断路器》中将增加附录(规范性)“瞬时脱扣断路器(ICB)”;该附录适用于仅具有短路保护功能的断路器。

(3) GB 14048.6《低压开关设备和控制设备 第4-2部分:接触器和电动机起动器—交流半导体电动机控制器和起动器》:将增加欠电流继电器或脱扣器;欠电压继电器或脱扣器;堵转式电子过载继电器;阻塞式电子过载继电器性能及试验要求。

(4) GB/T 14048.12《低压开关设备和控制设备 第4-3部分:接触器和电动机起动器—交流半导体电动机控制器和起动器》:将增加带或不带旁路开关电器的控制器和起动器的特性。

(5) GB 17885《家用和类似用途的机电式接触器》:将增加新使用类别“AC-7c”;带补偿的放电灯通断控制;增加规范性附录:封闭式接触器的防护等级;增加规范性附录:带有保护隔离的设备的要求和试验。

(6) GB/T 18858《低压开关设备和控制设备控制器-设备接口》系列标准:增加许多 AS-i 总线相关的具体功能要求。

3.1.2 家用断路器及类似设备类标准

(1) GB 16916.1《家用和类似用途的不带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCCB) 第1部分:一般规则》标准:将增加有关 RCCB 的绝缘配合和隔离功能的附加要求和试验。

(2) GB 16917.1《家用和类似用途的带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCBO) 第1部分:一般规则》标准:将增加有关 RCBO 的绝缘配合和隔离功能的附加要求和试验。

(3) GB 17701《设备用断路器》标准将增加规范性附录:适合隔离用设备断路器的附加要求。

3.1.3 低压熔断器类标准

将进行标准结构调整:针对现有标准进行结构调整,将原 GB/T 13539.2 及 GB 13539.3 撤销,原 GB/T 13539.6 和 GB/T 13539.5 修改为新的 GB/T 13539.2 和 GB/T 13539.3,原 GB/T 13539.2 及 GB 13539.3 撤销的内容并入 GB 13539.1 或新的 GB/T 13539.2 或 GB/T 13539.3,原 GB/T 13539.4 及 GB 13539.7 合并成新的 GB/T 13539.4。经此调整后,低压熔断器标准结构显得简单紧凑,用户只需 2 份标准即可进行试验,方便标准的使用。

3.1.4 低压系统内设备的绝缘配合类标准动态

GB/T 16935.1《低压系统内设备的绝缘配合 第1部分:原理、要求和试验》标准将修改小于 0.01mm 电气间隙的尺寸确定方法;修改用于功能绝缘的爬电距离的插入法;修订涉及筋的爬电距离的确定。

3.2 低压电器标准发展趋势

目前低压电器产品的开发从过去注重追求高指标逐步趋于追求高可靠性、小体积、低成本及绿色电器方向发展。低压电器行业将全面开展我国第四代低压电器产品开发。第四代低压电器产品特点：

- (1) 带有通信接口，能与多种开放式现场总线进行双向通信，实现低压电器可通信、网络化。
- (2) 强调系统集成，产品包括硬件、软件。
- (3) 强调标准化，第四代产品除结构、技术性能标准化，其通信协议、通信规约必须标准化，使产品具有较好的互操作性。
- (4) 提高产品综合性能，包括技术性能、外观、使用性能、维护性能。
- (5) 强调环保要求，逐步发展“绿色”产品，包括产品材料选用、制造过程及使用过程不污染环境。

(6) 开展可靠性设计，产品生产过程进行可靠性控制(大力推进在线检测装置)、可靠性出厂检验等。特别强调电子器件可靠性及电磁兼容要求。

针对上述低压电器的发展趋势，低压电器标准化发展的重点方向、重点领域为：

- (1) 电子化、智能化、通信遥控技术：将制定有关低压电器通信方面的标准，如 GB/T 21207—2007《低压开关设备和控制设备 人网工业设备描述的基本原则》等。
- (2) 绿色、环保、节能技术：将制定有关环境影响及材料应用等方面的标准。
- (3) 低压防雷技术：将制定有关电信和信号网络电涌保护器应用技术规范等内容的标准。
- (4) 新型电器方面：将制定如家用选择性导线保护断路器、三位使能开关、流量开关等标准。
- (5) 可靠性技术：将制定有关低压电器可靠性的系列基础标准。

第17章 低压电器主要工艺

1 低压电器主要工艺及发展动向

1.1 概述

1.1.1 低压电器具有独特的工艺和材料要求

低压电器是面广量大的基础元件,产品的品种、规格繁多,应用面很广,对性能要求高。

低压电器制造除具有一般机械制造工艺的共同点外,还有其专业制造工艺的特点。与机械制造最显著的共同点有两个:第一,低压电器的主体结构也是由金属材料制成的机械构件,用以完成支承、传动等机械功能。低压电器产品中有有色金属和黑色金属的比重约占总质量的70%~80%;第二,低压电器零件的加工方法主要是采用切削加工和压力加工等金属加工工艺,而冷冲压工艺在断路器制造中又占有十分重要的地位。低压电器根据其性能要求、结构造型和体积大小等因素,又有其自己的结构造型和制造工艺方面的特点:结构复杂和工艺涉及面广,材料品种规格多,精度要求复杂,尺寸精度高,工艺装备多等特点。

(1) 结构复杂和工艺涉及面广。低压电器产品中的零件,有许多是由板料制成,尤其是断路器,由于其结构造型的特点,绝大部分零件是由薄板冲压成型的。因此,冷冲压工艺(如剪切、冲压、弯曲、延伸、卷边等)在低压电器制造中占有十分重要的地位。板料冲压是制造断路器产品的主要工艺。模压成型的塑料零件在低压电器制造中占有十分重要地位,因此塑料压制、注射、绝缘处理等工艺也很重要;断路器触头的连接、部件的组合和断路器的装配,常常采用气体保护焊、钎焊等焊接工艺,也采用先进的激光焊,外观更为美观;另外还有铁心制造、线圈制造、弹簧绕制、装配调试、热处理工艺、防腐与涂覆工艺、超净环境和超净措施等。

(2) 材料品种规格多。低压电器是集机电性能要求于一体的产品,其产品结构设计必须满足产品的电磁性能和机械性能。因此,低压电器对所采用材料的性能有多方面的要求,有些材料不仅要有良好的机械性能,还应有良好的导磁、导电和导热等性能;有的材料要求有较高的绝缘强度和耐电弧性能;有的还提出耐磨损、耐化学腐蚀的要求。产品结构造型和材料又与制造工艺密切相关,制造工艺又是影响结构造型的重要因素。各种材料也应有良好的工艺性。在断路器制造中,采用的材料品种规格可达上千种,其中大量采用的是铜、银及其合金等有色金属、贵重和稀有金属。

(3) 精度要求复杂。低压电器在工作过程中,不仅有简单的机械运动,同时还伴随着一系列光、电、热、磁等能量转换。因此,低压电器产品的许多零件不仅要求有一定的几何形状、尺寸和相互位置精度,还应考虑材料的导电、导热、导磁和灭弧性能对产品特性的影响。而且零部件的精度等级也必须与低压电器的技术参数相匹配,如触头的压力、接触电阻、动作和释放参数、动作时间、允许温升等,这些参数要求都与零件几何形状、尺寸、表面粗糙度等有关系,否则,可能由于这些参数不合格而造成严重的故障。在低压电器制造中,某些零件的尺寸精度并不一定是影响产品性能

的主要因素,但对影响产品电磁特性的零件相互间的位置、几何形状精度以及热处理规范等提出较高的要求。在低压电器制造中保证几何形状尺寸精度的基础上,应重视断路器物理参数的容差分析;应进一步研究某些零件几何形状尺寸精度、材料性能等对物理参数的影响程度。因此,在选择各种工艺方案时,还应考虑各种工艺方案对零件导电、导磁、绝缘以及产品动作性能的影响程度等因素。

(4) 尺寸精度高。现代电器制造技术日益向精密化方向发展,这是为适应断路器制造的自动化的要求,同时也对零件尺寸精度和原材料尺寸公差提出了更高的要求。低压电器生产厂加速企业的技术改造,积极推广应用数控技术和数显装置改造原有的机械加工设备,无疑是一条多快好省地提高尺寸精度的重要途径。

1.1.2 低压电器结构零件的冲压化、塑料化和装配自动化

产品结构工艺性方面,低压电器正向着结构零件的冲压化、塑料化和装配自动化方向发展。

冷冲压工艺随着冲压设备的发展和模具水平的提高,逐步实现冲压工艺自动化,冲压加工的发展趋势是高速化、自动化、数控化、精密化、多功能化。

在国外低压电器厂的冲压车间,高速冲床的采用已相当普遍,广泛应用在零件冲压加工、触头生产线、铁心冲压上,冲压速度一般为300次/min,最高达1000次/min;送料、冲制、理料到废料收集全部自动化,冲制的坯料已全部带料化、规格化,专业厂家可提供各种规格尺寸,黑色、有色、镀铜、镀锌甚至局部镀稀有金属的卷料。

多功能冲床是在自动冲床的基础上增加钻孔、攻丝、铆压甚至切割等功能而发展起来的一种新型冲压设备,特别适用于低压电器复杂零件的加工,而且应用越来越多,如多功能自动弯曲成型机,可进行冲压、攻丝、铆压、弯形,可以解决一般连续模难于加工的复杂弯曲零件,效率很高。

而高速冲床与多功能冲压设备相结合则形成冲压加工中心,根据零件的复杂程度不同,冲压加工线的组成也不同。有的功能模块是专门为某个零件而设计的,材料可能也是特殊要求的,但这种组织管理形式的生产效率很高,西门子公司铁心、触头就是在这些冲压加工中心上完成的。

冲压加工与部件组装相结合又是一种工艺的发展趋势。在国外的一些冲压车间采用一台高速冲床,有几种带料或盘料从不同方向自动送入模具,先完成各自的冲压成型,然后将这些零件(两个或三四个零件)组装起来或铆合成型,完成一个部件的生产。像塑壳断路器的结构部件、灭弧罩等部件的生产都已实现,生产效率极高。

钣金加工是低压成套开关柜生产中的重要部分,随着计算机技术的发展,在国外由数控剪板机、数控转塔式冲床、数控折弯机及无人运输系统、立体仓库等组成的柔性制造系统,通过计算机管理实现自动化生产。特别是CNC激光切割机的广泛应用,使钣金件设计、加工更加灵活、快捷,大大节省了模具制造的时间和费用,缩短了生产周期,并可适于各种材质。

塑料因其具有各种优异独特的性能,所以在低压电器产品中应用广泛,低压电器产品的外壳、高强度结构件,耐弧、耐

热、阻燃的灭弧、传动部件都采用各类热塑性、热固性塑件加工。随着塑料品种的不断发展和各种新型的材料在低压电器上有更多的应用，一些知名的塑料供应商还专门开发具有卓越的电气绝缘性能、耐热耐老化、具有高强度、高刚度且尺寸稳定性好等高性能工程材料，来满足低压电器性能要求。

国外塑料零件的成型工艺发展较快，随着设备的更新，全自动、无人化生产的先进设备得到广泛使用，热固性注塑机代替手工操作压塑成型工艺，热塑性材料注塑加工采用集中自动送料系统，通过高压气体压入管道，送至各注塑机料斗，注塑成型、脱模、机械手自动取浇口、零件自动分选（合格品和不合格品），袋装一次完成。几十台注塑机只需两三人看管，主要是运送工件、废料或处理偶然故障。对于注塑件中金属嵌件也有新工艺相配套，为满足自动加工，注塑件均无金属嵌件，而是采用热压金属嵌件机来完成嵌件埋设；通过对塑压件钻孔、装嵌件、热压、冷却、固化来完成。对于塑料零件的检测，一般采用样板和量块，尺寸精度要求高的采用三坐标测量或非接触式测量，对于关键塑料件还需作热变形特性试验及应力测试。

触头作为低压电器中关键的零件，国外小容量触头制造正向高度自动化发展，大容量触头制造则以半自动化为主。

金属切削加工在部分低压电器产品中应用较多，国外的发展趋势是数控化，数控机床可节省辅助时间、节约刀具夹具、减少调整费用，而且重复动作精度高、加工灵活性大，适于小批量多品种生产。

国外低压电器产品的部件装配正向各种类型的专用组装机发展，有全自动也有半自动，像塑壳式断路器的动静触头部件、双金属部件、灭弧罩组装，断路器的操动机构、脱扣器单元组装等在 ABB 等国外公司均已实现自动或半自动装配。这类设备的应用已十分广泛，并有逐渐取代手工组装的趋势。当然，国内企业随着加快技术改造，也实现了部分部件的专用组装机组装。同时，我们还应看到国外低压电器组装也还保留有手工作业情况，但其应用完备的工位器具和巧妙的夹具来保证装配的精确度，并大量采用气动机械和气动工具来减轻工人劳动强度，提高生产效率，这是国内低压电器生产厂需要学习和借鉴的。

对于低压电器的总装配，一般国内采用的是全工序装配方式或传送带式半自动装配线。对于一些小开关或批量不大的开关采用所谓封闭装配方式，即由一个工人从头至尾完成一台产品。对于批量较大的产品，工件传递由传送带来完成，安装工序由工人手工完成或由专用设备来完成，国内生产规模较大的企业均配备了此类手工操作与自动化相结合的或规定节拍流水装配线用于塑壳式断路器、万能式断路器等生产。

在国外则有自动化水平及生产效率更高的自动装配机，整个装配过程可由机械手通过计算机控制来完成全部工序，还有不改变装配生产程序就可以进行多品种小批量生产的柔

性制造系统，各工序配有自动检测器检查质量、检测性能，实现划时代的高速装配。

低压电器制造需要大量的模具和工位器具、夹具等工艺装备。模具的发展水平已经逐步成为衡量制造水平的重要标志。模具成型具有高精度、高复杂性、高统一性以及高效率等诸多其他任何加工方式都无法比拟的优点。

高速自动冲床的普遍采用，其连续冲模精度一般为 3~5 μ m，硬质合金模具寿命可达上亿次，塑料成型模具寿命可达 250 万次。

高精度的模具需要高精度的加工设备来保证，模具加工广泛采用数控数显设备，加工中心、高精度数控线切割机、电火花成型加工机、坐标镗床、坐标磨床、光学曲线磨床、激光修补机、高频振动抛光或超声波研磨机，正是有了高精良的设备和先进的加工工艺，良好的工人技术素质和精益求精的工作精神，才会有高质量的模具。

1.1.3 低压电器制造技术必须向专业化、现代化方向发展

注重产品工艺性和提高产品制造技术水平是当今低压电器行业发展的一个趋势；新技术、新工艺、新设备的应用，使得低压电器制造技术向专业化、现代化方向发展。低压电器制造厂需在以下几个方面努力改进来提高我国低压电器工艺水平：

(1) 必须不断提高低压电器关键材料如工程塑料、触头材料、双金属材料、磁性材料、导电材料、弹簧材料、真空电器相关材料以及压敏电阻等专业化、现代化制造水平。

(2) 必须不断提高模具制造的专业化、现代化水平。我国低压电器行业模具制造整体水平与国外差距甚大，目前国内部分先进企业已经大量引进国外高精度数控模具加工设备，但是提高模具设计水平和加工工艺水平是一个长期的过程。

(3) 必须不断提高关键零部件如触头焊接等制造工艺和关键设备的制造水平。

(4) 必须不断提高自动装配检测生产线的自动化程度，提高自动装配检测生产线专业化制造能力。

1.2 塑料件的成型及结构工艺性

1.2.1 概述

塑料的优异特性及用途已经众所周知。随着当代科学技术的发展，人们发现从宇宙飞船到人民日常生活，都愈来愈离不开塑料，因而对“塑料世界”的提法并不感到过分。几乎所有的塑料都具有良好的电绝缘性和耐电弧性，还有优异的耐磨、减摩及自润滑性能；还具有优良的吸收振动能、冲击能以及抗疲劳与消声的作用。此外塑料的加工性能好，生产过程简单、成本低、效率好，因而被广泛地应用于电器制造业，这对于节约金属材料，提高产品技术经济指标，改善产品外形结构造型等方面都具有特别重要的意义。

1.2.2 塑料件成型工艺

(1) 常用塑料的特性与用途，见表 2.17-1。

表 2.17-1 常用塑料的特性与用途		
塑料名称	特 性	用 途
聚乙烯 (PE)	(1) 结晶型热塑性塑料，可分为高压聚乙烯 (HDPE) (又称低密度聚乙烯) 和低压聚乙烯 (LDPE) (又称高密度聚乙烯) (2) 呈乳白色，蜡状半透明，柔而韧，半透明，比水轻，吸水性小，无毒，耐化学性能好 (3) 成型加工方法可采用注塑成型、挤出成型、真空吸塑成型等	大量用于电线、电缆、电器零件
聚苯乙烯 (PS)	(1) 非结晶型热塑性塑料，具有突出的透明度、优异的电性能、低的吸水性 (2) 质脆，耐热及耐老化性差，易燃 (3) 采用注塑成型、挤出成型、发泡成型等成型方法	广泛用于包装、电器产品透明外壳以及发泡包装和保温材料

续表

塑料名称	特 性	用 途
丙烯腈—丁二烯—苯乙烯共聚物 (ABS)	(1) ABS 是非结晶型热固性塑料 (2) 不透明但具有良好的着色性, 具有良好的韧性和力学强度的工程塑料 (3) 良好的尺寸稳定性, 良好的电气绝缘性, 特别在低温下不但有很好的韧性, 而且有良好的耐磨性 (4) 采用注射成型、挤出成型及真空吸塑成型等	广泛用于各种工业产品中, 尤其在家用电器产品、仪器仪表产品中应用较广
聚甲醛 (POM)	(1) 结晶型热塑性塑料, 通常为白色, 可着色, 易燃烧 (2) 具有综合的优良性能, 有较好的刚性和硬度, 极佳的耐疲劳性和耐磨性, 较小的蠕变性和吸水性, 较好的尺寸稳定性, 化学稳定性, 良好的电器绝缘性和耐热性 (3) 采用注射成型、挤出成型	常用于工业产品的结构件、轴承、凸轮、齿轮等
聚酰胺 (PA)	(1) 结晶型热塑性塑料, 品种有 PA6、PA66、PA610、PA1010 等 (2) 具有强度高、坚韧、耐磨、电绝缘性好的特点 (3) 能耐化学及有机溶剂, 稳定性好, 但吸水性大 (4) 可采用注射成型、挤出成型及浇注成型等	广泛用于机械电器产品中作为传动件、结构件、耐磨件
PA46	(1) 具有极高的机械特性, 在 140~270℃ 条件下具有很高的硬度, 即使在高达 220℃ 的温度下其性能依然出色 (2) 具有极佳的流动性, 易于填充复杂的模型 (3) 具有很好的刚性, 可在生产中反复使用, 使零部件具有耐久性 (4) 具有优越的抗磨损、抗腐蚀性能, 耐热润滑油性能出色, 特别是在高温条件以及承重条件下该性能尤佳 (5) 在 100℃ 以上的高温条件下抗疲劳、抗变形性能优越 (6) 熔融温度高达 295℃, 可耐 280℃ 的高温 (7) 结晶速度快, 可使生产率提高 40%	用于制作耐高温或有承重要求的零部件
聚砜 (PSU)	(1) 非结晶型热塑性塑料, 硬而具耐磨性、强度高、耐热性好、绝缘性优良 (2) 耐油, 耐汽油, 但不耐有机溶剂 (3) 采用注射成型、挤出成型	广泛用于电器绝缘件, 特别用于高温下的绝缘零件
聚苯醚 (PPO)	(1) 非结晶型热塑性塑料, 具有突出的电性能, 良好的热稳定性, 高的热变形温度, 韧性好而吸水性低, 难燃有自熄性 (2) 在频率和温度变化范围很大时, 绝缘性能保持不变 (3) 成型温度较高 (300~330℃), 故可添加其他塑料改性, 改善加工性能 (4) 可采用注射成型	主要用于电器产品的绝缘件和耐高温电器中的结构件等
聚碳酸酯 (PC)	(1) 非结晶型热塑性塑料, 它具有高抗冲击强度和抗蠕变性能, 有较好的耐热性和耐寒性, 电绝缘性良好, 吸水性小, 尺寸稳定性好, 透光性、耐磨性均好, 并有自熄性, 但耐有机溶剂性差 (2) 采用注射成型、挤出成型, 成型制品易产生应力开裂, 应特别注意消除残余应力	通常应用于电器产品中的结构件和绝缘件, 如线圈骨架、插头、插座触头罩等零件
PC/ABS 合金	(1) 具有良好的耐应力开裂性能, 较好的刚性和韧性, 缺口冲击强度对厚度不敏感 (2) 继承了 PC 和 ABS 的大部分优异性能, 与 PC 相比耐应力开裂性能大为提高 (3) PC 和 ABS 树脂合金属非晶与非晶的半相溶体系	在电子电器中有广泛的应用, 用于制造机械零部件
聚对苯二甲酸丁二醇酯 (PBTP)	(1) 非结晶型热塑性塑料, 它具有韧性和耐疲劳性好, 吸水性和吸湿性小, 在潮湿高温条件下, 具有优良的电绝缘性 (2) 耐化学药品、耐油、耐有机溶剂性好 (3) 可采用注射成型	广泛用于日用电器、工业电器、仪器仪表产品中的结构件、绝缘件, 如开关外壳等
不饱和聚酯塑料 (UP)	(1) 它是以不饱和聚酯树脂为基料, 加入交联剂、引发剂、润滑剂、低收缩剂以及填料 (如玻璃纤维) 配制而成, 呈粒状、块状、团状、片状、带状的干式或湿式模塑料, 如 BMC、DMC、SMC 等 (2) 具有较好的电性能和机械强度、耐热性高、收缩率小、阻燃性好、耐电弧性优等综合性能好的塑料, 而且成型工艺优良、成型时间短、成型压力低的优点 (3) 可采用压制成型、注射成型及传递成型	广泛用于各种电器产品中作为结构件, 耐电弧、耐燃的零件, 如触头座、绝缘子、绝缘隔板等
玻璃纤维增强塑料 (RP)	(1) 近年来几乎在所有的热固性、热塑性塑料中均可填充 10%~45% (质量比) 的玻璃纤维, 并通过浸渍、捏和、混炼等工艺制成 (2) 各种塑料通过玻璃纤维增强, 改善原塑料的耐热性、硬度、尺寸稳定性、阻燃性, 特别是热固性塑料通过长玻璃纤维增强, 提高机械强度 (3) 采用压塑成型、注射成型、挤出成型及传递成型	广泛用于各种工业产品, 在电器产品中大量采用增强塑料 (如 BMC、DMC、SMC、增强 PA、PC、PP、PBTP 等) 加工成各种绝缘件和结构件

(2) 塑料成型工艺过程。热固性塑料压制成型工艺过程是塑料在一定型腔中，通过加压且通常需要加热的成型方法。也就是将粉状、粒状、纤维状、片状和碎屑等塑料放入成型温度下的模具型腔中，然后闭模加压而使其成型并固化的作业。其成型工艺过程如图 2.17-1 所示。



图 2.17-1 热固性塑料压制成型工艺过程

热塑性塑料注射成型工艺过程是使颗粒状塑料在加热的料筒中均匀塑化成熔融状态的黏稠液体，由柱塞或螺杆在一定压

力下注入闭合的模具型腔中，经冷却硬化成型。其成型工艺过程如图 2.17-2 所示。

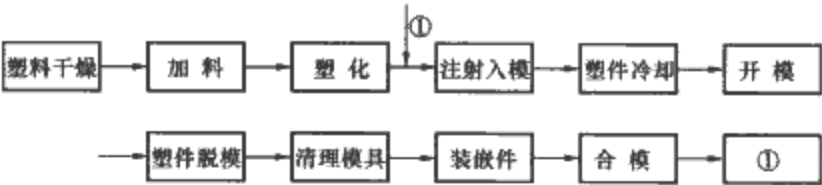


图 2.17-2 热塑性塑料注射成型工艺过程

1.2.3 制品缺陷分析

(1) 热固性塑料压制成型制件常见的缺陷及解决措施，见表 2.17-2。

表 2.17-2 热固性塑料压制成型制件常见的缺陷及解决措施		
制品缺陷	产生原因	解决措施
表面起泡或鼓起	塑料中水分与挥发物含量太大 模温过热或过冷 成型压力不足 成型时间过短 加热不均匀 放气不足	将塑料进行干燥或预热 调整适当温度 提高压力 增长压制时间 均匀加热模具 必要时放气
翘曲、变形	成型时间不够 制品厚薄不均，形状不规则 上下模温差过大 顶杆放置不对称，顶出不均匀	放长固化时间 改进制品设计 调整温度 合理设置顶杆，顶出均匀
疏松、缺料	用料量不够 压力不足 塑料流动性过小或过大 闭模太快，排气太快 模具温度太高，闭模速度太慢	调整用料量 增大压力 调整加工工艺，选用合适材料 减慢闭模或排气速度 加快闭模或降低模具温度
裂缝	固化时间过长，顶出开裂 顶出不均，顶杆位置不合理 嵌件边缘塑料厚度不够 制品厚度不均 塑料中水分和挥发物含量过大，材料收缩率大	缩短固化时间 均匀顶出，调整顶杆位置 增加厚度 改进制品设计 选用合适材料或进行预热
表面灰暗	模具表面粗糙度不合适 润滑剂选用不合理 模温过高或过低	提高模具光洁度 改用适合的润滑剂 调整成型温度
黏模	塑料中润滑剂用量不当 模具表面粗糙度过大 模温太低 成型时间太短 死角部分树脂含量大，强度低	检查塑料 打光模具或涂脱模剂 提高模具温度 放长固化时间 适当开设排气槽
制品尺寸不符合图样	模具尺寸不符要求 塑料收缩率变化太大	修正模具 选用合适收缩率的塑料
飞边太厚	加料量过多 塑料流动性太大 模具间隙太大	正确称量 加压速度放慢 修正模具
制品变色	成型温度太高 塑料本身色泽不均 有其他色泽物质混入	降低模具温度 调换塑料 正确用料
表面橘皮状	塑料颗粒度太粗 成型温度太高，闭模速度太快	预热塑料，更新塑料 闭模速度降慢
电性能不符合要求	塑料含水量大 塑料固化时间太短 塑料中含有金属污物 塑料本身电性能差	进行预热干燥 放长成型时间 防止外来杂物 更换合格塑料

(2) 热塑性塑料注射成型常见的缺陷及解决措施，见表 2. 17-3。

表 2. 17-3 热塑性塑料注射成型常见的缺陷及解决措施

制品缺陷	原 因	解决措施
熔接痕	料筒温度太低 模具温度太低 注射速度过慢 模具排气不良 浇口太多 注射压力太低 模具温度太低	提高料筒温度 提高模具温度 提高注射速度 改进模具结构 合理设置浇口 提高注射压力 提高模具温度
成型不足	料筒及喷嘴温度偏低 加料量不足 材料流动性差 模具排气不良 注射速度太慢 注射时间太短 浇口堵塞 制品太薄 注射压力太小	提高料筒及喷嘴温度 增加用料 更换材料 增设排气槽 提高注射速度 放慢注射时间 清理浇口 改进制品尺寸 提高注射压力
裂纹	制件冷却时间太长 顶出装置倾斜或不平衡 模具温度太低 顶杆总截面太小 嵌件未预热或温度不够 拔模斜度不够	缩短冷却时间 顶出均匀 提高模具温度 加大顶杆 嵌件预热到温度 改进模具斜度
制品溢边	注射压力过大 合模不紧 锁模力太小 塑料温度过高 注射速度太快 模具温度太高 成型品的投影面积过大	调整注射压力 调整模具闭合水平 增大锁模力 降低塑料温度 降慢注射速度 降低模具温度 使用大型成型机
气泡	塑料干燥不良 模具排气不良 背压不够 注射压力太小 制品厚薄不均 料筒温度太高	干燥塑料 改进模具 提高背压 提高注射压力 改进制品设计 降低料筒温度
凹痕	注射压力太小 注射速度太慢 加料量不足 注射及保压时间太短 流道浇口太小 塑料件壁厚不均或太厚	提高注射压力 提高注射速度 加大用料量 提高注射及保压时间 增大流道浇口截面积 改进制品设计
银丝和斑纹	原料含水量过高 料筒温度太高或太低 注射压力太小 浇注系统截面过小 冷却时间不够	材料要干燥好 严格控制料筒温度 提高注射压力 增大浇注系统截面积 延长冷却时间
变形翘曲	浇口位置不当 顶出不均，顶杆分布不均 顶出速度太快 模温太低或太高 制品厚薄不均 保压时间过短 冷却时间不足	改进浇口位置 改进模具顶出杆位置 均匀缓慢顶出 调整模温 改进制品设计 增长保压时间 延长冷却时间

续表

制品缺陷	原 因	解决措施
制件强度下降	料筒温度太低，塑化不均 注射速度太低 注射压力太低 螺杆转速太高 制件内应力大 模具温度太低 塑料强度低 塑料回料次数多 材料含湿量大	严格控制料筒温度 提高注射速度 提高注射压力 降低螺杆转速 消除内应力 提高模具温度 调换塑料 减少回料次数 很好地干燥塑料

1. 2. 4 塑料件的结构工艺性

在设计产品零件时，除选用合适的塑料材料外，还必须考虑塑料制件的加工工艺性。塑料制件的工艺性与其成型模具设计有着密切关系，因此必须认真分析塑料件的工艺适应性，慎重考虑塑料件的工艺结构，由此可见，根据成型加工工艺要求设计的塑料制件，不仅能保证塑料件的顺利成型和防止产生缺陷，而且能达到降低成本及提高生产效率的目的。为此设计人员应该注意以下制造方面事项。

塑料件设计的一般原则：

- (1) 充分考虑塑料件的成型工艺性，如流动性。
- (2) 塑料件的形状在保证使用要求的前提下应有利于充模、排气、补缩，同时能适应高效冷却硬化。
- (3) 塑料件的设计应考虑成型模具的总体结构，特别是抽芯与脱出制品的复杂程度，同时应充分考虑到模具零件的形状及制造工艺，以便使制品具有较好的经济性。
- (4) 塑料件的设计主要内容是零件的形状、尺寸、壁厚、孔、圆角、加强筋、螺纹、嵌件、表面粗糙度的设计。

1. 2. 4. 1 壁厚

通常产品必须具有均匀的壁厚，如果变化不可避免，则利用转换区的方法来防止突变如图 2. 17-3 所示（均壁厚），且浇口位于较厚处以防止充填不满。

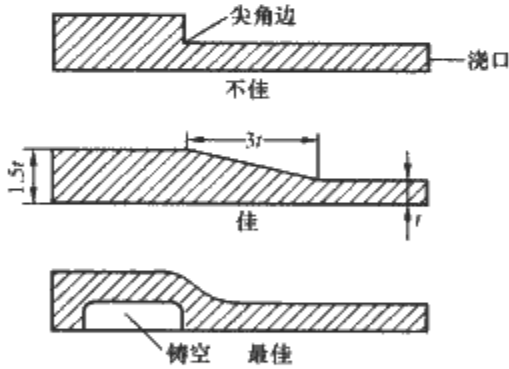


图 2. 17-3 利用转换区调整壁厚

因为不均匀的壁厚会造成严重的翘曲及尺寸控制的问题，易在塑料件上产生气孔、裂纹，引起内应力及变形等缺陷。塑料件壁厚首先取决于使用性能，即在强度、结构、质量、电性能、尺寸稳定性及装配等方面满足其功能要求。因玻璃纤维等增强塑料的流动性差，只能成型壁厚厚而高度不大、形状简单的塑料件，流动性好的塑料就可以成型薄而大的、形状复杂的塑料件。如果产品需要较高的强度，从成本的观点上来看，用加强筋比增加壁厚要好得多。但如果产品需要好的外观表面时，则因凹陷痕会在表面上产生，故须避免之。若非得用筋不可时，则应尽量让凹陷痕出现在筋的另一面或较不显眼处。图 2. 17-4 所示为使壁厚均匀的一些方法。

总之，一般的原则就是能够利用最小的壁厚，完成最终产品所须具备的功能。表 2. 17-4 所示为一般热塑性塑料制品的壁厚表，表 2. 17-5 所示为热固性塑料制品的壁厚表。

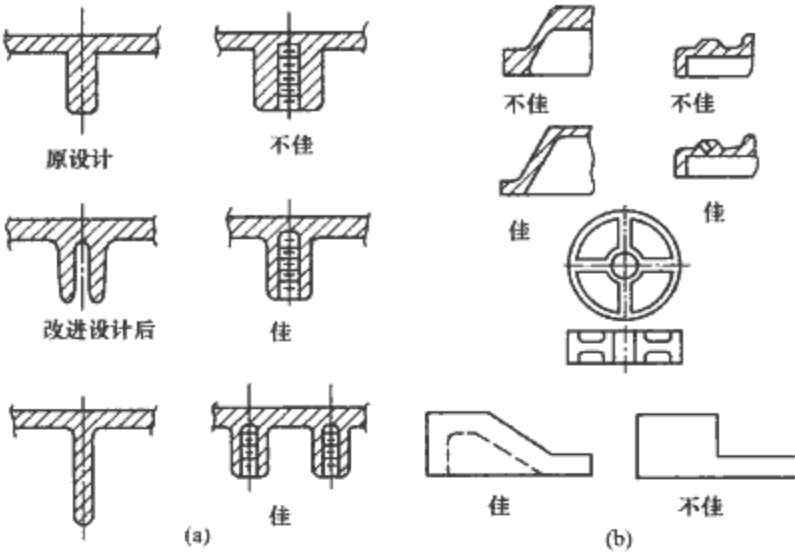


图 2.17-4 壁厚均匀的一些方法
(a) 利用筋及浮凸物；(b) 利用铸空法

表 2.17-4 某些热塑性塑料件壁厚推荐值 mm

塑料制品材料	最小壁厚	最大壁厚	推荐壁厚
聚甲醛 (POM)	0.4	3	1.6
ABS	0.75	3	2.3
醋酸纤维素 (CA)	0.6	4.7	1.9
氟塑料	0.25	12.7	0.9
尼龙 (PA)	0.4	3	1.6
聚碳酸酯 (PC)	1	9.5	2.4
聚酯 (PET)	0.6	12.7	1.6
低密度聚乙烯 (LDPE)	0.5	6	1.6
高密度聚乙烯 (HDPE)	0.9	6	1.6
聚丙烯 (PP)	0.6	7.6	2
聚砜 (PSU)	1	9.5	2.5
改性聚苯醚	0.75	9.5	2
聚苯醚 (PPO)	1.2	6.4	1.5
聚苯乙烯 (PS)	0.75	6.4	1.6
改性聚苯乙烯	0.75	6.4	1.6
苯乙烯-丙烯腈共聚物 (SAN)	0.75	6.4	1.6
硬质聚氯乙烯 (RPVC)	1	9.5	2.4

表 2.17-5 某些热固性塑料件壁厚推荐值 mm

塑料制品材料	最小壁厚	最大壁厚	推荐壁厚
醇酸树脂 (玻璃纤维填充)	1.0	12.7	3.0
醇酸树脂 (矿物填充)	1.0	9.5	4.7
邻苯二甲酸二烯丙酯 (DAP)	1.0	9.5	4.7
环氧树脂 (玻璃纤维填充)	0.76	25.4	3.2
三聚氰胺甲醛树脂 (纤维素填充)	0.9	4.7	2.5
氨基塑料 (纤维填充)	0.9	4.7	2.5
酚醛塑料 (通用型)	1.3	25.4	3.0
酚醛塑料 (棉短纤填充)	1.3	25.4	3.0
酚醛塑料 (玻璃纤维填充)	0.76	19.0	2.4
酚醛塑料 (织物填充)	1.6	9.5	4.7
酚醛塑料 (矿物填充)	3.0	25.4	4.7
硅酮 (玻璃纤维填充)	1.3	6.4	3.0
聚酯预混物	1.0	24.4	1.8

1.2.4.2 过渡圆角

为了避免应力集中，提高强度和便于脱模，零件的各面连接处应设计过渡圆角。零件结构无特殊要求时，在两面折弯处应有圆角过渡，一般半径不小于 0.5~1mm， $R \geq t$ 。凡

能设计成圆角的地方均设计成圆角，会有一系列好处。在塑料成型时熔料流动阻力小，有利于改善流动充模特性；可以防止因塑料收缩而导致的塑料变形；因锐角而引起的应力集中，使塑料的强度增大，模具使用寿命延长；塑料外形也因圆弧过渡而显得更为美观。同时，与塑料相对应的模具成型零件，在热处理时不易裂口，强度大为增强。

内外圆角过渡与半径如图 2.17-5 所示。零件内外表面的拐角处设计圆角时，应保证零件壁厚均匀一致，图 2.17-5 中以 R 为内圆角半径， R_1 为外圆角半径， t 为零件的壁厚。

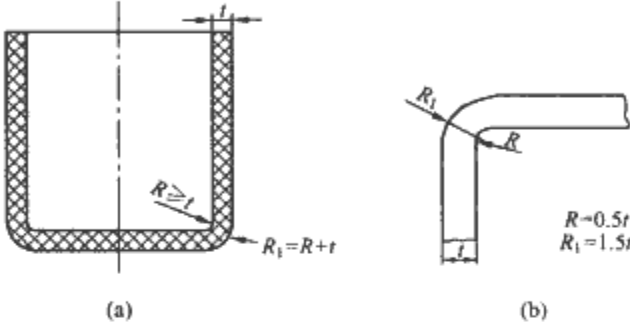


图 2.17-5 内外圆角过渡与半径
(a) 圆角过渡；(b) 内外圆角半径

1.2.4.3 加强筋

为了确保零件的强度和刚度，而又不使零件的壁厚过大，有效地克服翘曲与变形现象，并能避免因壁厚不均而产生的缩孔、气泡、凹陷等现象。可在零件的适当部位设置加强筋。加强筋还可以起到辅助浇道的作用，改善了熔料流动与充模状态，有利于塑料件成型。

增设加强筋后，可能在其背面引起凹陷。但只要尺寸设计得当，就可有效地予以避免，见图 2.17-6。

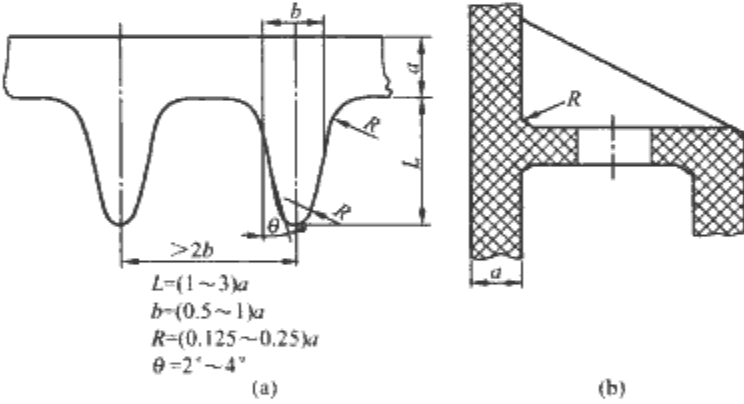


图 2.17-6 加强筋
(a) 示例一；(b) 示例二

图 2.17-6 (b) 中筋的高度与圆角半径对应表，见表 2.17-6。

表 2.17-6 筋的高度与圆角半径 mm				
h	6	6~13	13~19	19 以上
R	0.8~1.5	1.5~3	3~5	6~7

设计加强筋时，应使中间筋低于外壁 0.5~1mm，见图 2.17-7。以减少支承面积，达到平直要求。

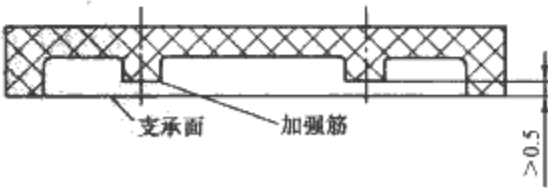


图 2.17-7 加强筋与支承面

1.2.4.4 浮凸物

在塑料件上设计具有功能性的锥台或支承块，统称为浮凸物。设计浮凸物的目的是用来连接组合螺钉、导销、栓等

作用。设计浮凸物的最重要原则为避免其无支撑物，并尽量让其与外壁或肋相连如图 2.17-8 所示。一般而言，肋外径须为圆孔直径的 2~2.5 倍，以保证有足够的强度。应当指出，浮凸背可能会形成收缩凹痕。此种外观缺陷，可在相应部位设计装饰花纹予以掩盖。

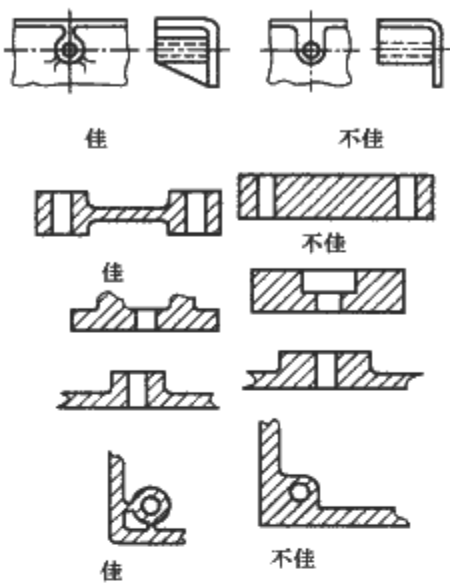


图 2.17-8 浮凸物结构

如果浮凸物本身即与外壁间隔相当远，则最好加上角板如图 2.17-9 所示。

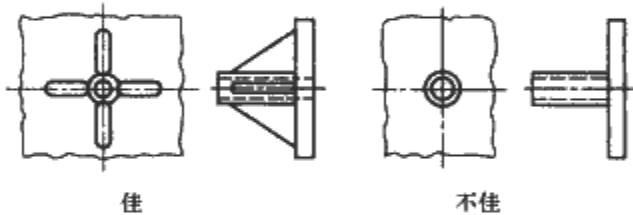


图 2.17-9 浮凸物的加强

图 2.17-10 和图 2.17-11 分别所示为肋靠近外壁及远离外壁时浮凸物的设计。

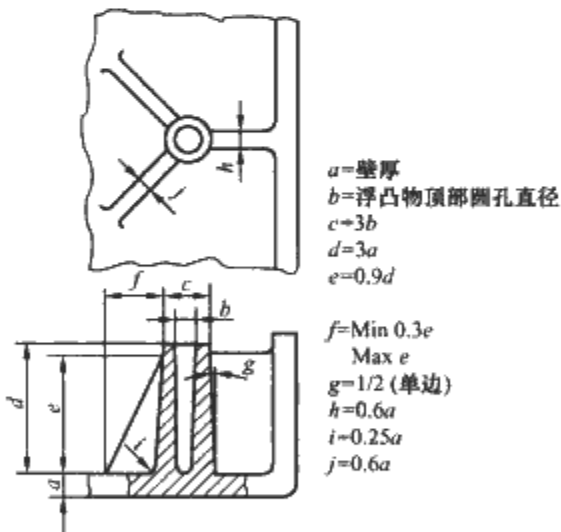


图 2.17-10 肋靠近外壁时浮凸物的设计

1.2.4.5 孔的设计

基于各种各样的功能要求，塑料件上常常需要设置各种各样的孔眼。设计孔时要满足塑料件的使用要求，使孔的形状、位置要有利于塑料件成型，同时还要保证塑料件有足够的的使用强度。孔的周壁厚会影响到孔壁的强度。按图 2.17-12 所示，孔口与塑料件边缘间距离 a 不应小于孔径，并不小于零件壁厚 t 的 0.25 倍。孔口间的距离 b 不宜小于孔径 d 的 0.75 倍，并不小于 3mm。

(1) 孔的周壁厚 H 、突起部分的壁厚 c 和高度 h ， h 与 c 之比不大于 3，如图 2.17-13 所示。其尺寸可参考表 2.17-7。

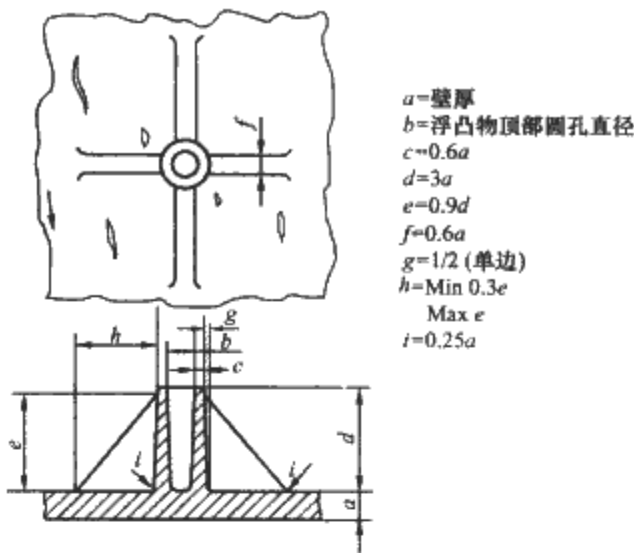


图 2.17-11 肋远离外壁时浮凸物的设计

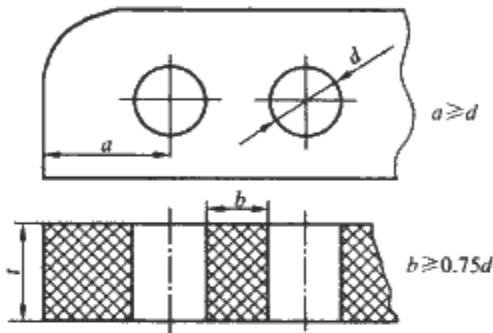


图 2.17-12 孔的设计要求 1

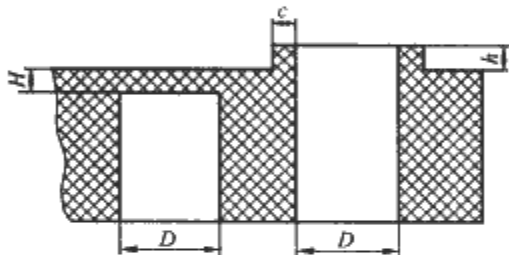


图 2.17-13 孔的设计要求 2

表 2.17-7 孔的设计尺寸参考

D	~3	>3~6	>6~10	>10~18	>18~30	>30~50
H 和 c	1	1.5	2.5	3.5	4	5

(2) 孔深不大于 2 倍孔径情况下的最小直径，见表 2.17-8。

表 2.17-8 孔深不大于 2 倍孔径时的最小直径 mm

材 料	PA	其 他	玻璃纤维	塑压件
d	0.5	0.8	1	1.5

1.2.4.6 螺纹

按图 2.17-14 所示，内螺纹直径不能小于 2mm，外螺纹直径不能小于 4mm，螺距不小于 0.5mm，螺纹的拧合长度一般不大于螺纹直径的 1.5 倍，为了防止塑料螺纹的第一扣牙崩裂，并保证拧入，必须在螺纹的始端和末端留有 0.2~0.8mm 的圆柱形。并注意：塑料件螺纹不能有退刀槽，否则无法脱模。

1.2.4.7 嵌件

嵌入塑料件的零件，叫做嵌件，如图 2.17-15 所示。由于用途不同，嵌件的形式不同，材料也不同，但使用最多的是金属嵌件，它的优点是提高塑料制品的机械强度、磨损寿命、尺寸的稳定性和精度。嵌件外塑料层最小厚度见表 2.17-9。

表 2.17-9 嵌件外塑料层最小厚度

嵌件直径 D	≤ 4	>4~8	>8~12	$\geq 12\sim 16$	≥ 16
最小壁厚 t	≥ 1.5	≥ 2	≥ 3	≥ 4	≥ 5

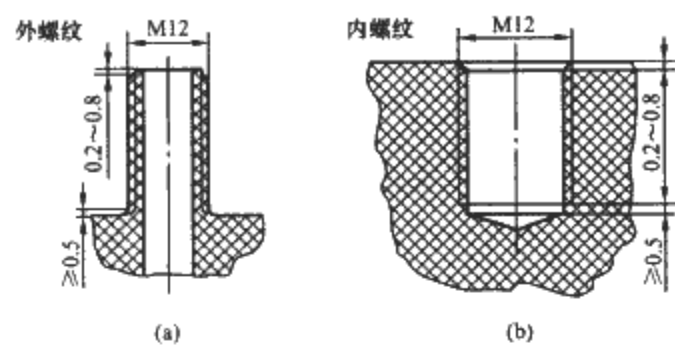


图 2.17-14 内/外螺纹设计
(a) 外螺纹设计; (b) 内螺纹设计

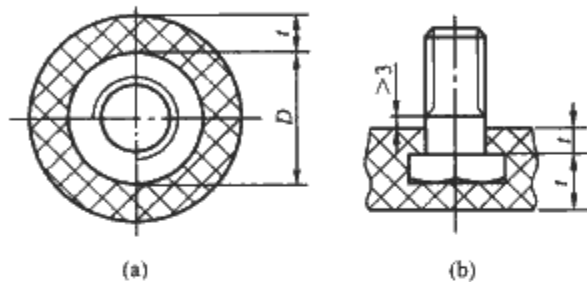


图 2.17-15 带嵌件的塑料件图例
(a) 示例一; (b) 示例二

1.2.4.8 压花

塑料件的周围上滚花, 也可以压制。
滚花必须是直的, 并与脱模方向一致, 滚花形状如图 2.17-16 所示, 其尺寸可参考表 2.17-10。

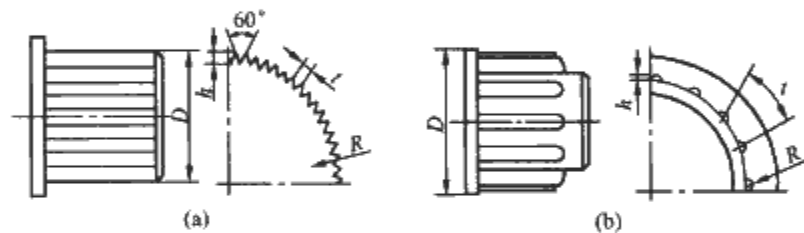


图 2.17-16 塑料件的滚花
(a) 细花纹; (b) 粗花纹

表 2.17-10 滚花的尺寸				
直径 D	≤ 18	$>18\sim50$	$>50\sim80$	$>80\sim120$
齿距 t	1.2~1.5	1.5~2.5	2.5~3.5	3.5~4.5
半径 R	0.2~0.3	0.3~0.5	0.5~0.7	0.7~1
齿高 h	$\approx 0.86t$			
直径 D	≤ 18	$>18\sim50$	$>50\sim80$	$>80\sim120$
齿距 t	$4R$			
半径 R	0.3~1	0.5~4	1.5~5	2~6
齿高 h	$0.8R$			

1.2.4.9 自攻螺钉预留底孔直径

其结构见图 2.17-17 (L 为自攻螺钉长度), 螺纹规格与尺寸见表 2.17-11。

表 2.17-11 螺纹规格与尺寸			mm
螺纹规格	ϕ	D	
ST 2.2	1.7	5	
ST 2.9	2.4	6	
ST 3.5	2.9	7	
ST 4.2	3.4	9	
ST 4.8	4.2	11	

1.2.4.10 脱模斜度

塑料件在模塑成型过程中, 塑料从熔融状态转变为固体状态, 将会产生一定量的尺寸收缩, 从而使塑料件紧紧地包

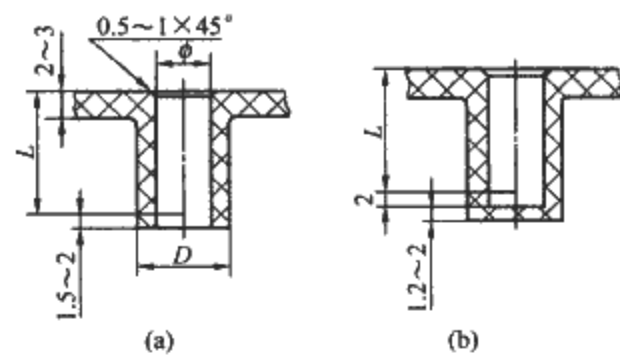


图 2.17-17 自攻螺钉底孔结构
(a) 一般情况结构; (b) 特殊情况结构

在模具型芯或型腔中凸起部分。为此必须考虑塑料件内外壁应有足够的脱模斜度。

脱模斜度, 指平行于模具起闭模方向, 塑料件壁面所应具有的倾斜度, 如图 2.17-18 所示 (α 为斜角)。脱模斜度的方法有三种。

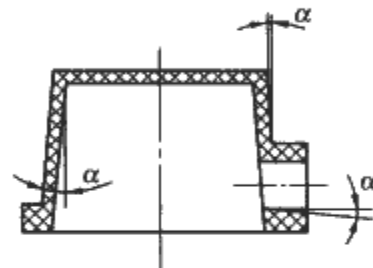


图 2.17-18 塑料件脱模斜度

如果塑料件结构上不允许有锥度, 就应在模具上固有相应的工艺斜度。但其所取值必须在塑料件制造公差范围内, 且最小不能小于 $10'$ 。脱模斜度影响塑料件去留方向, 从而影响模具推出机构位置。在一般情况下, 塑料件的最小脱模斜度见表 2.17-12。常见塑料件脱模斜度的推荐值见表 2.17-13~表 2.17-15 所示。

表 2.17-12 塑料件最小脱模斜度		
项 目	最小脱模斜度	
	一般情况	特殊情况
一般情况	3°	2°
脱模斜度不能太大时	0.5°	0.25°
突出部位肋	5°	4°
格子、孔	5°	4°
皮革纹	6°	4°

表 2.17-13 热固性塑性表面的脱模斜度			
长度 (mm)	<10	$10\sim30$	>30
斜角	$25'\sim30'$	$30'\sim35'$	$35'\sim40'$

表 2.17-14 热固性塑料件上孔的脱模斜度		
长 度 (mm)	直 径 (mm)	脱模斜度
4~10	2~10 >10	$15'\sim18'$ $18'\sim30'$
20~40	5~10 >10	$10'\sim15'$ $15'\sim18'$

表 2.17-15 几种热塑性塑料件的脱模斜度		
塑 料 名 称	脱 模 斜 度	
	塑件外表面	塑件内表面
尼龙 (通用)	$20'\sim40'$	$25'\sim40'$
尼龙 (增强)	$20'\sim50'$	$20'\sim40'$
聚 乙 烯	$20'\sim45'$	$25'\sim45'$
氯化聚醚	$25'\sim45'$	$30'\sim45'$
有机玻璃	$30'\sim50'$	$35'\sim1^\circ$
聚碳酸酯	$35'\sim1^\circ$	$30'\sim50'$
聚苯乙烯	$35'\sim1^\circ30'$	$30'\sim1^\circ$
ABS	$40'\sim1^\circ20'$	$30'\sim1^\circ$

1.2.5 塑料件尺寸精度

塑料件精度的高低取决于成型过程与所使用的材料。影响塑料件尺寸精度的因素甚多，且十分复杂，如图 2.17-19 所示。但主要有以下因素。

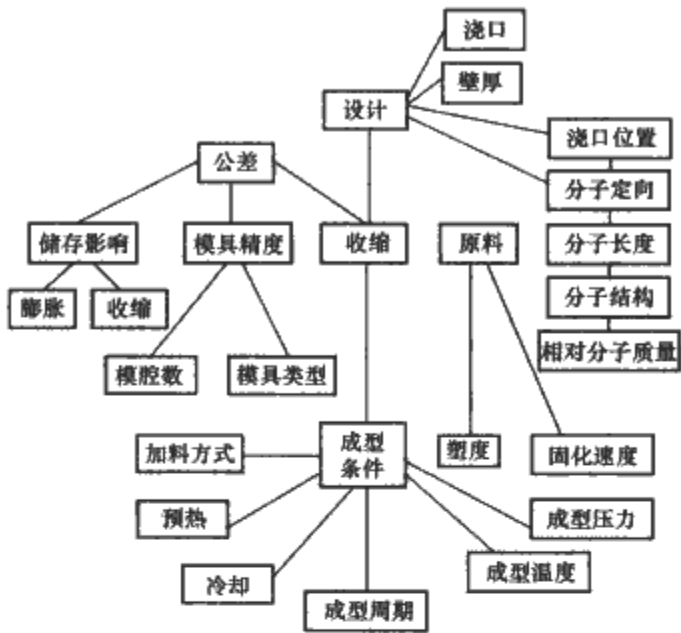


图 2.17-19 影响塑料件尺寸精度的因素

1.2.5.1 材料因素

塑料的收缩率是影响塑件尺寸精度最基本、最重要的因素。不仅不同品种及牌号塑料的收缩率不同，即便是同种塑料也存在有批次间的收缩率差别。通常，收缩率小、收缩波动范围窄的塑料，如聚碳酸酯、ABS、聚苯乙烯、聚砜、硬聚氯乙烯等，因其成型工艺条件的波动造成的误差小，塑料件能获得较高的尺寸精度。反之，收缩率波动居中的聚丙烯、尼龙、聚甲醛等，塑料件只能获得一般的尺寸精度。不言而喻，收缩率波动大的聚乙烯、软质聚氯乙烯等，塑料件就只能获得较低的尺寸精度。

热固性塑料，通常比热塑性塑料的收缩率波动范围小，一般为 0.4%~0.5%，而热塑性塑料可高达 3%。因此，热固性塑料制成的塑料件可获得较高的尺寸精度。

用碎布、石棉等作为填料的耐冲击或耐热塑料，在模压成型过程中毛边厚、压力不易均匀分布，因此难以获得跨越分型面的、具有较高的塑料件尺寸精度。

无机填料可降低塑料的收缩率波动值，因而有利于提高塑料件尺寸精度。

1.2.5.2 设计因素

遵循塑料件设计原则，合理确定几何结构，正确选择塑料件材料，充分考虑塑料件成型工艺性，必要时可增设加强筋、金属嵌件等，以降低塑料件收缩程度，从而提高塑料件尺寸精度及尺寸稳定性。否则，塑料件就可因收缩程度大、翘曲变形或吸湿膨胀等，而使其尺寸精度及稳定性降低。

1.2.5.3 模具因素

模具类型不同对塑料件尺寸精度影响各异。用压塑模成型时，在其分型面上有余料存在，对塑料件尺寸精度有不良影响。用注塑模成型、传递模成型的塑料件尺寸精度，与浇口数量及位置有关。浇口数量少，熔体流程远，收缩程度大，塑料件尺寸精度低；反之，塑料件尺寸精度就高些。或者说，大型塑料件尺寸精度低，小型塑料件尺寸精度高。用固定式模具成型的塑料件尺寸精度比移动式模具要高些，单腔模比多腔模成型的塑料件尺寸精度高。脱模装置不合理或冷却系统设计不当，也会使塑料件变形，产生形位误差。

模具加工精度对塑料件尺寸精度有重要影响。对于小尺寸塑料件，模具加工误差约占塑料件成型总误差的 1/3；对

于大中型塑料件，模具加工误差所占比例要小些。

1.2.5.4 工艺因素

塑料件成型操作条件，如温度、压力、时间，以及在成型期间塑料件中产生的分子取向、纤维取向、分子结晶等，均会对塑料件尺寸精度产生影响。

成型条件的变化，主要表现为塑料件的收缩率波动，是引起塑料件尺寸误差的直接原因，仅次于模具加工精度的影响因素。通常，塑料熔体温度高、模腔压力传递快、塑料件收缩小，其尺寸精度高；模腔压力高、保压时间长，亦有塑料件尺寸精度高的结果。但模温高、温差大、浇口冻结快，会有塑料件尺寸精度低的结果。

热固性塑料件尺寸精度，除受到模压时间、温度及成型压力的影响外，还与成型方法有关。若有预压工序，成型时间长、熔体温度高，酚醛塑料件的收缩值随之增大。

一般认为，由于成型条件的波动而造成的误差，约占塑料件总误差的 1/3。

1.2.5.5 环境因素

由于存放、使用条件的变化，会导致塑料件性能的变化。像尼龙、醋酸纤维那样一些吸湿性强的塑料件，环境条件对其尺寸精度有重要影响。

温度变化对热塑性塑料制件的尺寸影响大。其中，结晶型聚合物的玻璃态温度低于室温或塑料件的使用温度时，大分子链段尚有运动能力，后结晶不可避免地导致塑料件密度、尺寸及力学性能发生变化。

酚醛塑料制件因冬天气温低、干燥，进一步收缩，其尺寸变小；夏季气温高、潮湿，导致吸湿膨胀，尺寸变大。

塑料热膨胀系数大。因此，高精度塑料件在温度变化的条件下工作十分不利，这对于工业用途的塑料件影响甚大。为此采用增强改性塑料，如玻璃纤维填充聚碳酸酯、尼龙、聚苯醚等，其塑料件尺寸稳定性已有很好的使用效果。热固性塑料中的 DAP、环氧树脂等，其塑料件尺寸稳定性也相当好。

此外，热塑性塑料件即使在常温条件下使用，也会因外力作用而产生蠕变，造成尺寸的变化。

基于引起塑料件尺寸变化的因素极为复杂，预测其变化量也十分困难。为此，对尺寸稳定性要求高的塑料件，须进行实验考核，仔细分析各种影响因素，予以合理、巧妙安排，使之达到预期目的。

1.3 冲压件结构工艺性

低压电器产品冲压零件比例占 70% 以上，结构件主要是由钣金材料经过冲压加工而成，这些冲压件的几何形状、尺寸和精度对冲压工艺影响很大。冲压件具有良好的加工工艺性有利于节省材料、减少工序、提高模具使用寿命和产品质量，同时，可以有效地降低产品成本。

按钣金件的基本加工方式，如冲裁、折弯、拉伸、成型，每一种加工方式所要注意的工艺要求，对冲压件结构设计都有所限制。

1.3.1 冲裁结构工艺

冲裁分为普通冲裁和精密冲裁，由于加工方法的不同，冲裁件的加工工艺性也有所不同。目前低压电器结构件应用最多的是普通冲裁。下面介绍普通冲裁的结构工艺性。

(1) 冲裁件的形状和尺寸尽可能简单对称，使排样时废料最少。冲裁件的排样见图 2.17-20。

有些零件稍稍更改设计如图 2.17-21 所示，就会得到更多的零件，将大大节约材料。

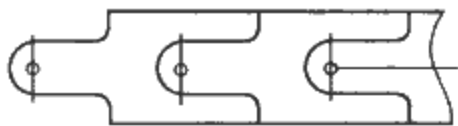


图 2.17-20 冲裁件的排样

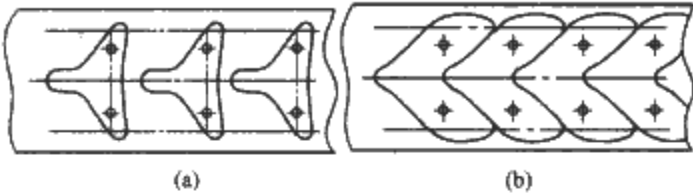


图 2.17-21 零件更改设计
(a) 改样一；(b) 改样二

(2) 冲裁件的外形及内孔应避免尖角（见图 2.17-22）。在直线或曲线的连接处要有圆弧连接，尖角形式容易减短模具使用寿命，且尖角处容易产生裂纹。圆弧半径 $R \geq 0.5t$ (t 为材料壁厚)。

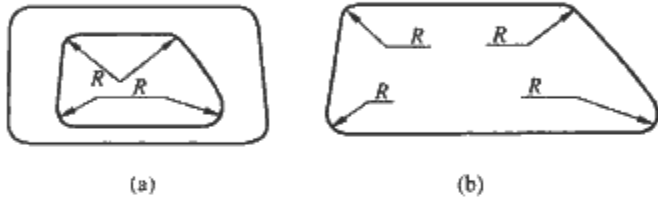
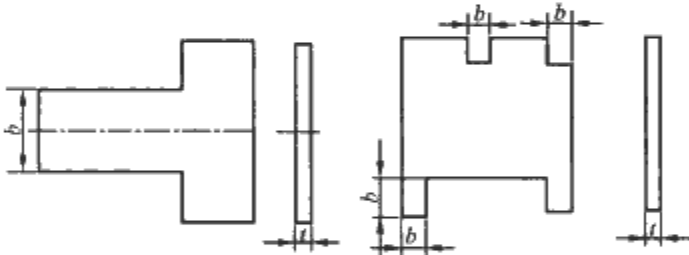


图 2.17-22 冲裁件圆角半径的最小值
(a) 内孔；(b) 外形

(3) 冲裁件应避免窄长的悬臂与凹槽（见图 2.17-23）。冲裁件的凸出或凹入部分的深度和宽度，一般情况下，应不小于 $1.5t$ (t 为料厚)，同时应该避免窄长的切口和过窄的切槽，以便增大模具相应部位的刃口强度。

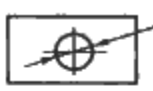
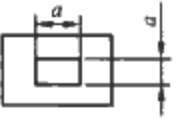


对一般钢 $b \geq 1.5t$;
对合金钢 $b \geq 2t$;
对黄铜、铝 $b \geq 1.2t$;
 t 为材料厚度。

图 2.17-23 避免窄长的悬臂和凹槽

(4) 孔优先选用圆形孔，冲孔有最小尺寸要求（见表 2.17-16）。冲孔优先选用圆形孔，冲孔最小尺寸与孔的形状、材料机械性能和材料厚度有关，因受到冲头强度的限制，冲孔的尺寸不能太小，否则容易损坏冲头。

表 2.17-16 冲孔最小尺寸列表

材 料		
冷轧板、电镀锌板、镀锌板	$d \geq 1.3t$	$a \geq 1.2t$
黄铜板	$d \geq 1.0t$	$a \geq 0.9t$
铝板	$d \geq 0.8t$	$a \geq 0.7t$

注 t 为材料厚度，冲孔最小尺寸一般不小于 0.3mm。

(5) 冲裁的孔边距与孔间距。零件的冲孔边缘离外形的最小距离随零件与孔的形状不同有一定的限制，零件上冲孔设计应考虑留有合适的孔边距和孔间距以免冲裂。最小孔边距和孔间距见图 2.17-24 (t 为材料厚)。

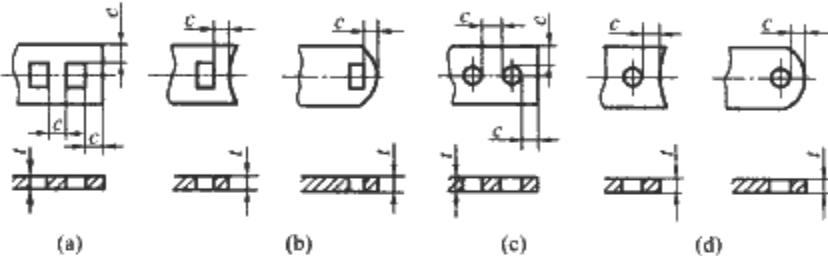


图 2.17-24 最小孔边距和孔间距简图

(a) 最小距离 $c \geq 3.5t$ ；(b)、(d) $c \geq 2t$ ；(c) $c \geq 3t$

(6) 折弯件或拉伸件冲孔时，其孔壁与工件直壁之间应保持一定的距离见图 2.17-25。

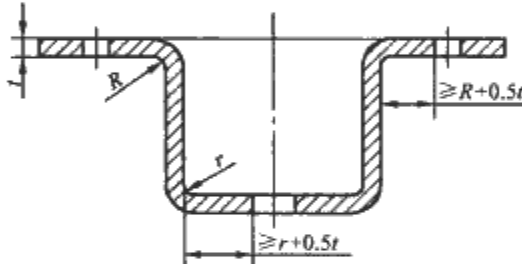


图 2.17-25 折弯件、拉伸件孔壁
与工件直壁间的距离

(7) 冲裁件毛刺的极限值及设计标注。

1) 冲裁件毛刺的极限值。冲裁件毛刺超过一定的高度是不允许的，冲压件毛刺高度的极限值见表 2.17-17。

2) 设计图纸中毛刺的要求。有些零件需明确毛刺方向，有些结构件还需要压毛刺。一般不要整个断面全部压毛刺，这样会增加成本。尽量在下面情况使用：暴露在外面的断面，人手经常触摸到的锐边，需要过线缆的孔或槽，有相对滑动的部位。

表 2.17-17

冲压件毛刺高度的极限值

mm

材料壁厚 (mm)	材料抗拉强度 (N/mm ²)											
	>100~250			>250~400			>400~630			>630		
	f	m	g	f	m	g	f	m	g	f	m	g
>0.7~1.0	0.12	0.17	0.23	0.09	0.13	0.17	0.05	0.07	0.1	0.03	0.04	0.05
>1.0~1.6	0.17	0.25	0.34	0.12	0.18	0.24	0.07	0.11	0.15	0.04	0.06	0.08
>1.6~2.5	0.25	0.37	0.5	0.18	0.26	0.35	0.11	0.16	0.22	0.06	0.09	0.12
>2.5~4.0	0.36	0.54	0.72	0.25	0.37	0.5	0.2	0.3	0.4	0.09	0.13	0.18

注 f 级（精密级）适用于较高要求的零件；m 级（中等级）适用于中等要求的零件；g 级（粗糙级）适用于一般要求的零件。

1.3.2 折弯

1.3.2.1 折弯件的最小弯曲半径

材料弯曲时，其圆角区上，外层受到拉伸，内层则受到压缩。当材料厚度一定时，内 r 越小，材料的拉伸和压缩就越严重；当外层圆角的拉伸应力超过材料的极限强度时，就会产生裂缝和折断，因此，弯曲零件的结构设计，应避免过小的弯曲圆角半径。常用材料的最小弯曲半径见表 2.17-18。

表 2.17-18 常用材料的最小弯曲半径

材 料	退火状态		冷作硬化状态	
	弯曲线的位置			
	垂直纤维	平行纤维	垂直纤维	平行纤维
08, 10	0.1 <i>t</i>	0.4 <i>t</i>	0.4 <i>t</i>	0.8 <i>t</i>
20, Q235-A	0.1 <i>t</i>	0.5 <i>t</i>	0.5 <i>t</i>	1.0 <i>t</i>
45, 50	0.5 <i>t</i>	1.0 <i>t</i>	1.0 <i>t</i>	1.7 <i>t</i>
60Mn, T8	1.2 <i>t</i>	2.0 <i>t</i>	2.0 <i>t</i>	3.0 <i>t</i>
纯 铜	0.1 <i>t</i>	0.35 <i>t</i>	1.0 <i>t</i>	2.0 <i>t</i>
软黄铜	0.1 <i>t</i>	0.35 <i>t</i>	0.35 <i>t</i>	0.8 <i>t</i>
黄铜 (半硬)	0.1 <i>t</i>	0.35 <i>t</i>	0.5 <i>t</i>	1.2 <i>t</i>
铝	0.1 <i>t</i>	0.2 <i>t</i>	0.3 <i>t</i>	0.8 <i>t</i>
半硬铝	1.0 <i>t</i>	1.5 <i>t</i>	1.5 <i>t</i>	2.5 <i>t</i>
硬 铝	2.0 <i>t</i>	3.0 <i>t</i>	3.0 <i>t</i>	4.0 <i>t</i>

- 注 1. 当弯曲线与轧纹成一角度时，应按角度大小，选取居于其间的数值。
2. 表中的数值适用于冲件毛刺在弯角内层的弯曲，毛刺在弯角外层时，应放大弯曲半径。
3. 在冲裁或剪切后没有退火的毛坯弯曲时，应作为硬化的金属选用。
4. t 为材料厚度 (mm)。

1.3.2.2 弯曲件的直边高度

(1) 一般情况下的最小直边高度要求。弯曲件的直边高度不宜太小，最小高度按 (见图 2.17-26) 要求： $h > 2t$ 。

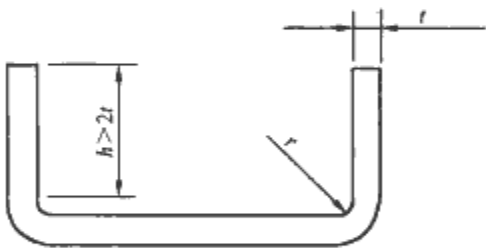


图 2.17-26 弯曲件的直边高度最小值

(2) 弯边侧边带有斜角的直边高度。当弯边侧边带有斜角的弯曲件时 (见图 2.17-27)，侧面的最小高度为 $h = (2 \sim 4)t > 3\text{mm}$ 。

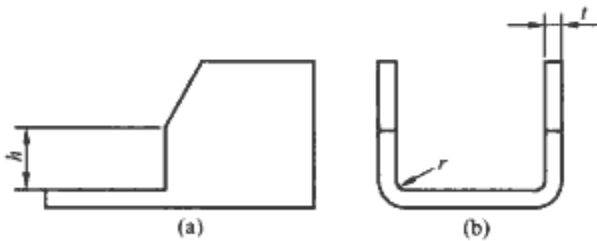


图 2.17-27 弯边侧边带有斜角的直边高度
(a) 正视图；(b) 左视图

1.3.2.3 折弯件上的孔边距

先冲孔后折弯，孔的位置应处于弯曲变形区外，避免弯曲时孔会产生变形。孔边距是孔壁至弯边的距离 (见表 2.17-19)。

表 2.17-19 折弯件上的孔边距

t (mm)	s (mm)	l (mm)	s (mm)
≤ 2	$s \geq t + r$	≤ 25	$s \geq 2t + r$
> 2	$s \geq 1.5t + r$	$> 25 \sim 50$	$s \geq 2.5t + r$
		> 50	$s \geq 3t + r$

1.3.2.4 局部弯曲的工艺切口

(1) 折弯件的弯曲线应避开尺寸突变的位置。局部弯曲某一段边缘时，为了防止尖角处应力集中产生开裂，可将弯曲线移动一定距离，以离开尺寸突变处 [见图 2.17-28 (a)]；开工艺槽 [见图 2.17-28 (b)]；冲工艺孔 [见图 2.17-28 (c)]。注意图 2.17-28 中的尺寸要求： $s \geq R$ ，槽宽 $k \geq t$ ，槽深 $L \geq t + R + k/2$ 。

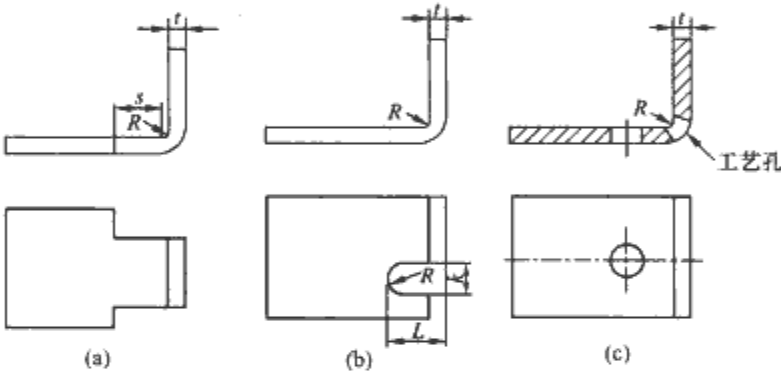


图 2.17-28 局部弯曲的设计处理方法

- (a) 移动弯曲线，离开尺寸突变处；
(b) 开工艺槽；(c) 冲工艺孔

(2) 当孔位于折弯变形区内时，所采取的切口形式示例见图 2.17-29。

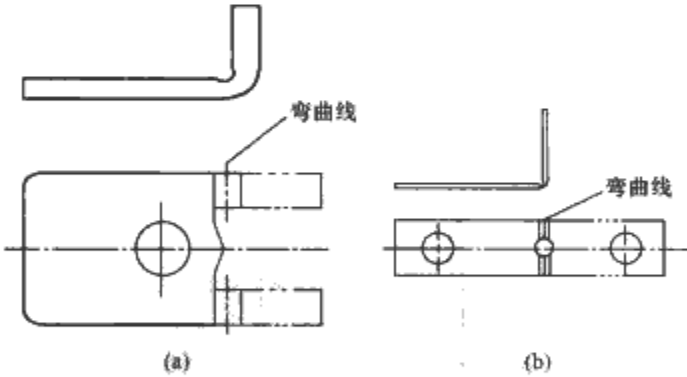


图 2.17-29 切口形式示例
(a) 示例一；(b) 示例二

1.3.2.5 带斜边的折弯边应避开变形区

带斜边的折弯边应避开变形区的示意图见图 2.17-30。

1.3.2.6 打死边的设计要求

打死边的死边长度与材料的厚度有关。如图 2.17-31 所示，一般死边最小长度 $L \geq 3.5t + R$ 。

其中 t 为材料壁厚， R 为打死边前道工序的最小内折弯半径。

1.3.2.7 设计时添加的工艺定位孔

为保证毛坯在模具中准确定位，防止弯曲时毛坯偏移而产生废品，应预先在设计时添加工艺定位孔，如图 2.17-32

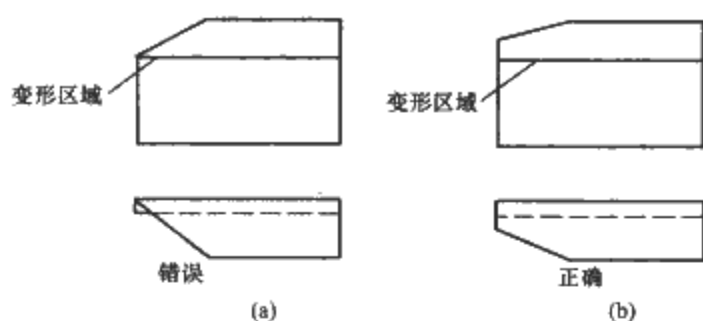


图 2.17-30 带斜边的折弯边应避开变形区的示意图
(a) 错误示意; (b) 正确示意



图 2.17-31 死边的最小长度 L
(a) 打死边前道工序; (b) 打死边后

所示。特别是多次弯曲成型的零件, 均必须以工艺孔为定位基准, 以减少累计误差, 保证产品质量。

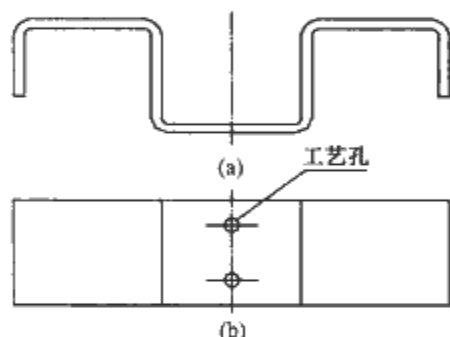


图 2.17-32 多次折弯时添加的工艺定位孔
(a) 正视图; (b) 俯视图

在 U 形弯曲件上, 两弯曲边最好等长, 以免弯曲时产生向一边移位。如不允许, 可设一工艺定位孔。如图 2.17-33 所示。

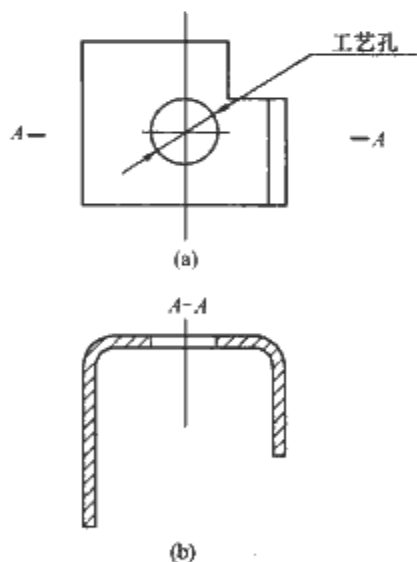


图 2.17-33 U 形弯曲件添加的工艺定位孔
(a) 正视图; (b) A-A 剖面图

1.3.2.8 防止侧面(梯形)弯曲时产生裂纹或畸形

防止侧面(梯形)弯曲时产生裂纹或畸形的措施见图 2.17-34。应设计预留切槽, 或将根部改为阶梯形。槽宽 $K \geq 2t$, 槽深 $L \geq t + R + K/2$ 。

1.3.2.9 凸部的弯曲

如图 2.17-35 (a) 所示那样弯曲线和阶梯线一致, 有时会在根部开裂变形。所以使弯曲线让开阶梯线如图 2.17-35 (b) 所示, 或设计切口如图 2.17-35 (c)、(d) 所示。

1.3.2.10 弯曲面上的孔边距

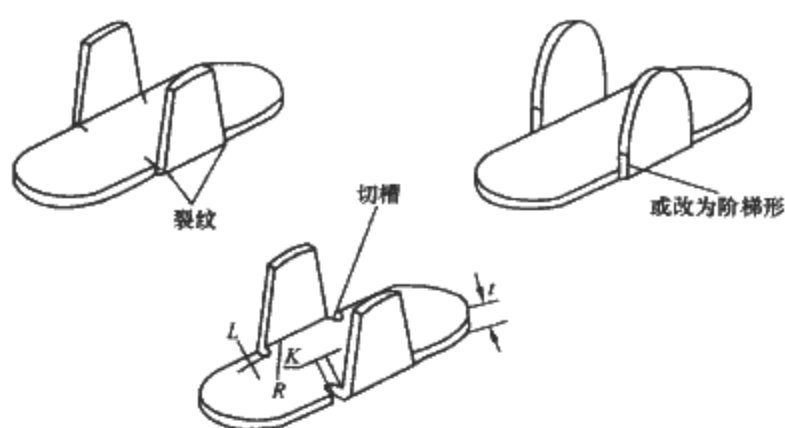


图 2.17-34 防止裂纹或畸形的措施

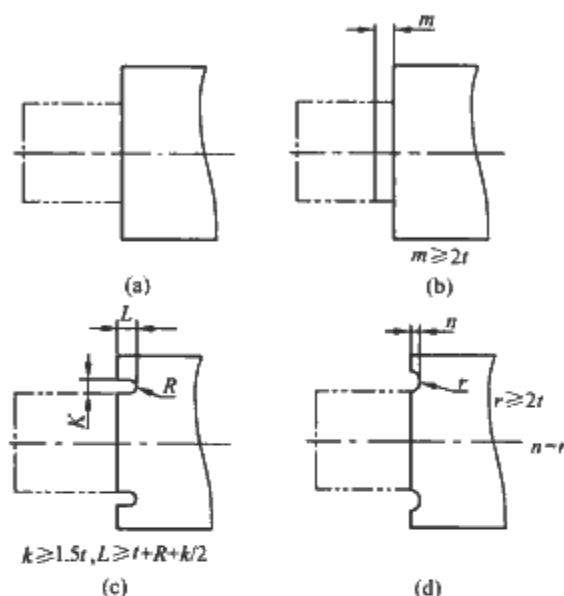


图 2.17-35 防止根部开裂变形的措施

- (a) 弯曲线和阶梯线一致;
- (b) 弯曲线让开阶梯线;
- (c) 设计切口一;
- (d) 设计切口二

防止弯曲时, 弯曲面上的孔受力后会变形, 如图 2.17-36 所示。

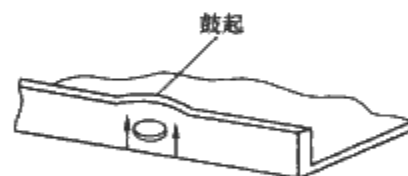


图 2.17-36 弯曲面上的孔边距要求

1.3.2.11 标注弯曲件相关尺寸

标注弯曲件相关尺寸时, 要考虑工艺性, 如图 2.17-37 所示。

如图 2.17-37 (a) 所示, 先冲孔后折弯, L 尺寸精度容易保证, 加工方便。

图 2.17-37 (b)、(c) 如果尺寸 L 和 L_2 精度要求高, 则需要先折弯后加工孔, 加工麻烦。

1.3.2.12 穿破件的结构设计

当搭接在一道工序中用冲切法制成 90° 的弯边时, 选材要注意材质不宜太硬, 否则易在直角弯折处破裂; 应在弯边位置设计工艺切口, 防止折角处破裂, 如图 2.17-38 所示。

1.3.2.13 弯曲件的回弹

影响回弹的因素很多, 包括材料的机械性能、壁厚、弯曲半径以及弯曲时的正压力等。

折弯件的内圆角半径与板厚之比越大, 回弹就越大。弯曲件的回弹, 可在模具设计时, 采取一定的措施进行规避。同时, 从设计上改进某些结构促使回弹角减少如图 2.17-39 所示。在弯曲区压制加强筋, 不仅可以提高工件的刚度, 也有利于抑制回弹。

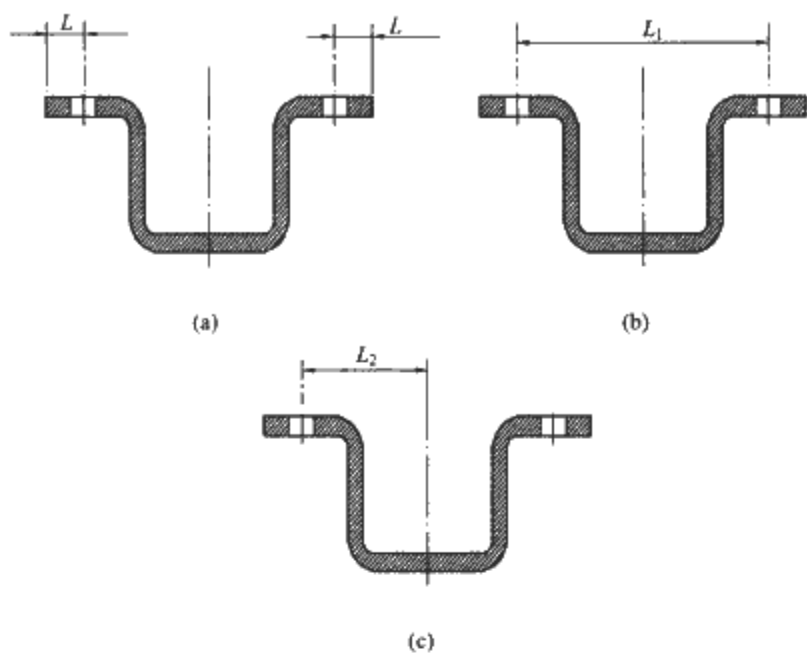


图 2.17-37 弯曲件标注示例
(a) 示例一；(b) 示例二；(c) 示例三

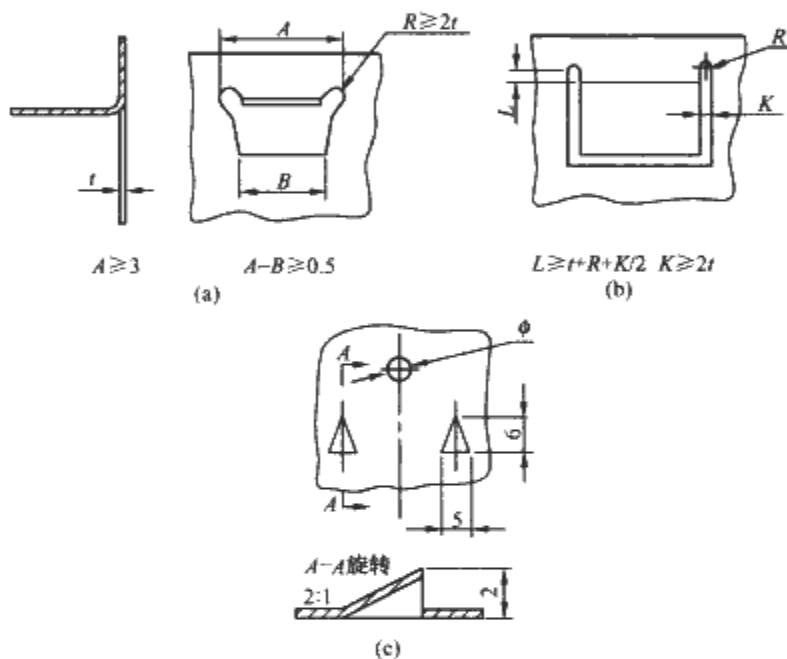


图 2.17-38 穿破件的结构设计
(a) 示例一；(b) 示例二；(c) 示例三

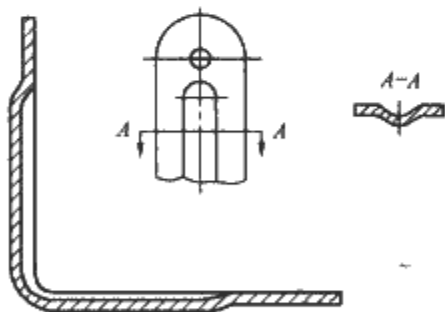


图 2.17-39 设计上抑制回弹的方法示例

1.3.3 拉伸

1.3.3.1 拉伸件底部与直壁之间的圆角半径大小要求

如图 2.17-40 所示，拉伸件底部与直壁之间的圆角半径应大于板厚，即 $r_1 \geq t$ 。为了使拉伸进行得更顺利，一般取 $r_1 = (3 \sim 5)t$ ，最大圆角半径应小于或等于板厚的 8 倍，即 $r_1 \leq 8t$ 。

1.3.3.2 拉伸件凸缘与壁之间的圆角半径

拉伸件凸缘与壁之间的圆角半径应大于板厚的 2 倍，即 $r_2 \geq 2t$ ，为了使拉伸进行得更顺利，一般取 $r_2 = (5 \sim 10)t$ （见图 2.17-40）。

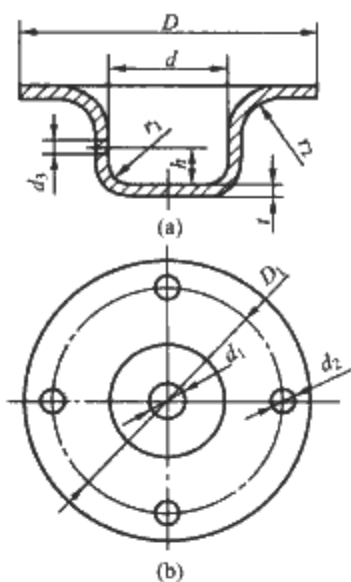


图 2.17-40 拉伸件圆角半径大小
(a) 正视图；(b) 俯视图

1.3.3.3 圆形拉伸件的内腔直径

圆形拉伸件的内腔直径应取 $d \leq D - 10t$ ，以便在拉伸时压板压紧不致起皱（见图 2.17-40）。

1.3.3.4 矩形拉伸件相邻两壁间的圆角半径

矩形拉伸件相邻两壁间的圆角半径（见图 2.17-41）应取 $r_3 \geq 3t$ ，为了减少拉伸次数应尽可能取 $r_3 \geq H/5$ ，以便一次拉出来。

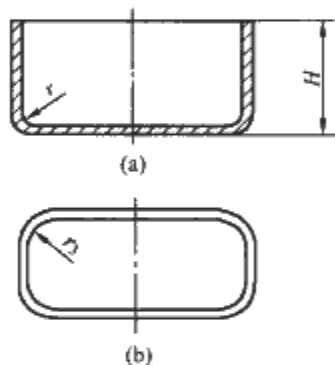


图 2.17-41 矩形拉伸件相邻两壁间的圆角半径
(a) 正视图；(b) 俯视图

1.3.3.5 圆形无凸缘拉伸件一次成型时高度与直径的尺寸关系

圆形无凸缘拉伸件一次成型时，高度 H 和直径 d 之比应小于或等于 0.4，即 $H/d \leq 0.4$ ，如图 2.17-42 所示。

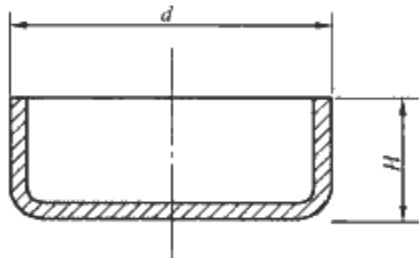


图 2.17-42 圆形无凸缘拉伸件一次成型时高度与直径的尺寸关系

1.3.3.6 拉伸件设计图纸上尺寸标注的注意事项

拉伸件由于各处所受应力大小不同，使拉伸后的材料厚度发生变化。一般来说，底部中央保持原来的厚度，底部圆角处材料变薄，顶部靠近凸缘处材料变厚，矩形拉伸件四周圆角处材料变厚。

1.3.3.7 拉伸件产品尺寸的标注方法

在设计拉伸产品时，对产品图上的尺寸，应明确注明必须保证外部尺寸或内部尺寸，不能同时标注内外尺寸。

1.3.3.8 拉伸件尺寸公差标注方法

拉伸件凹凸圆弧的内半径，以及一次成型的圆筒形拉伸件的高度尺寸公差为双面对称偏差，其偏差值为国标（GB）16级精度公差绝对值的一半，并冠以±号。

1.3.4 成型

1.3.4.1 加强筋

(1) 对较长的钣金件为了提高其强度，应该设计加固筋。筋的形状、尺寸及适宜间距见表 2.17-20。

表 2.17-20 筋的形状、尺寸及适宜间距

半圆形筋		尺 寸	h	B	r	R_1	R_2
		最小允许	$2t$	$7t$	t	$3t$	$5t$
		一 般	$3t$	$10t$	$2t$	$4t$	$6t$
梯形筋		尺 寸	h	B	r	r	R_2
		最小允许	$2t$	$20t$	t	$4t$	$24t$
		一 般	$3t$	$30t$	$2t$	$5t$	$32t$
加固筋之间及加固筋与边缘之间的适宜距离		$L \geq 3B \quad k \geq (3 \sim 5)t$					

(2) 在弯曲件的弯角处再作弯折，能起到筋条的加强作用。角部处加强筋的形状见图 2.17-43，其尺寸及筋间距见表 2.17-21。

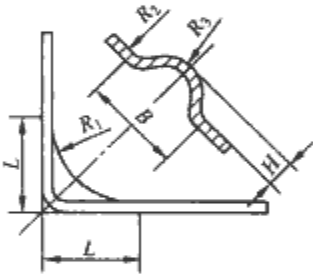


图 2.17-43 角部处加强筋

表 2.17-21 角部处加强筋尺寸及筋间距 mm

L	R_1	R_2	R_3	H	B	筋间距
12	6	9	5	3	16	60
15	7	12	6	4	20	70

注 B 为参考值。

1.3.4.2 打凸间距和凸边距的极限尺寸

打凸间距和凸边距的极限尺寸按表 2.17-22 中选取。

表 2.17-22 打凸间距和凸边距的极限尺寸 mm

简 图	D	L	I
	6.5	10	6
	8.5	13	7.5
	10.5	15	9
	13	18	11
	15	22	13
	18	26	16
	24	34	20
	31	44	26
	36	51	30
	43	60	35
	48	68	40
	55	78	45

1.3.4.3 孔翻边

孔翻边型式较多，应关注要加工螺纹的内孔翻边，如图 2.17-44 所示。

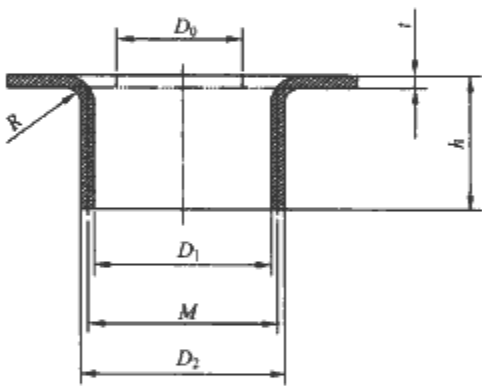


图 2.17-44 带螺纹孔的内孔翻边结构示意图

带螺纹孔的内孔翻边尺寸参数见表 2.17-23。

表 2.17-23 带螺纹孔的内孔翻边尺寸参数						mm
螺 纹	材料厚度 t	翻边内孔 D_1	翻边外孔 D_2	凸缘高度 h	预冲孔直径 D_0	凸缘圆角 半径 R
M3	0.8	2.55	3.38	1.6	1.9	0.6
	1		3.25	1.6	2.2	0.5
			3.38	1.8	1.9	
			3.5	2	2	
	1.2		3.38	1.92	2	0.6
			3.5	2.16	1.5	
	1.5		3.5	2.4	1.7	0.75
M4	1	3.35	4.46	2	2.3	0.5
	1.2		4.35	1.92	2.7	0.6
			4.5	2.16	2.3	
			4.65	2.4	1.5	
	1.5		4.46	2.4	2.5	0.75
			4.65	2.7	1.8	
	2		4.56	2.2	2.4	1

续表						
螺 纹	材料厚度 t	翻边内孔 D_1	翻边外孔 D_2	凸缘高度 h	预冲孔直径 D_0	凸缘圆角 半径 R
M5	1	4.25	5.6	2.4	3	0.6
	1.2		5.46	2.4	2.5	0.75
			5.6	2.7	3	
			5.75	3	2.5	
	1.5		5.53	3.2	2.4	1
			5.75	3.6	2.7	
	2		5.75	4	3.1	1.25
M6	1.2	5.25	7.0	3	3.6	0.75
	2		6.7	3.2	4.2	1
			7.0	3.6	3.6	
			7.3	4	2.5	
	2.5		7.0	4	2.8	1.25
			7.3	4.5	3	
	3		7.0	4.8	3.4	1.5

表 2.17-24 冲裁件的内形和外形的尺寸公差 mm

条料厚度 t	公差等级	基 本 尺 寸									
		~3	>3~6	>6~10	>10~18	>18~30	>30~50	>50~80	>80~120	>120~180	>180~260
~1	IT13 级	0.14	0.16	0.22	0.27	0.33	0.39	0.46	0.54		
	IT14 级									1.00	1.15
>1~2.5	IT14 级	0.25	0.30	0.36	0.43	0.52	0.62	0.74	0.87		
	IT15 级									1.6	1.9

(2) 冲裁件的表面粗糙度见表 2.17-25。

表 2.17-25 一般冲裁件剪切面的表面粗糙度

材料厚度 t (mm)	≤1	>1~2	>2~3	>3~4	>4~5
表面粗糙度 R_a (μm)	3.2	6.3	12.5	25	50

1.3.5.2 弯曲件的精度

弯曲件的精度与很多因素有关，如弯曲件材料的机械性能和材料厚度、模具结构和模具精度、工序的多少和工序的先后顺序、弯曲模的安装和调整情况以及弯曲件本身的形状尺寸等。精度要求较高的弯曲件必须严格控制材料厚度公差。

1.4 金属焊接

金属焊接在现代电器制造工艺中应用很广，具有很重要的地位。金属焊接是指通过适当的手段，使两个分离的金属体（同种金属或异种金属）产生原子及分子间结合而连接成一体的连接方法。通过焊接，把金属材料按一定形状和要求连接在一起，保证必要的性能，构成所需要的各种外形结构，以制成各种产品。

焊接方法种类繁多，就其焊接工艺特征，可分为三大类：

(1) 熔化焊。其特点是利用局部加热的方法，将焊接的接合处加热到熔化状态，冷凝后，彼此焊合在一起。常见的有：电弧焊、气焊等。

(2) 固相焊（加压焊）。其特点是在焊接时，对焊件不论加热与否，都施加一定的压力，使两个结合面紧密接触在一起，从而使两个焊件焊合起来。如电阻焊、摩擦焊等。

1.3.4.4 压印工艺、压花工艺

压印、压花工艺在钣金件上应用很多，包括标签粘贴位置指示、标记、标志，甚至商标、图案等，都可以利用这两种工艺进行加工。

(1) 压印工艺。压印是使材料厚度发生变化，将挤压的材料充塞在有起伏的模腔内，使零件上形成起伏花纹或字样。

一般情况下是在封闭模中进行，以免金属被挤到模子型腔外面；对于比较大的零件或形状特殊成型后进行切边的零件，可在敞开模中进行。为使零件得到良好的表面质量，成型前应将毛坯进行退火、酸洗、喷砂等处理。

(2) 压花工艺。压花工艺与压印类似，只是变形的深度较小，所需的压力也较小。压花的方法，深度 $h \leq 0.4t$ 时，在光面凹模上进行；深度 $h > 0.4t$ 时，在带有与凸模配合的相应凹槽的凹模上进行，其凹模的宽度要比凸模上的大一些，深度要比凸模上的浅。

1.3.5 冷冲压件的精度

1.3.5.1 冲裁件的精度

(1) 冲裁件的内形和外形的尺寸公差见表 2.17-24。

(3) 钎焊。对焊件和填充的钎料进行适当加热，待熔点低于焊件的焊料熔化后，借毛细现象填入焊件连接处的间隙中，冷凝后，使分离的焊件焊合在一起。在焊接过程中，焊件本身始终不熔化。在电器制造中，常见的有烙铁钎焊、火焰钎焊、炉中钎焊、电阻钎焊等。

1.4.1 电弧焊

电弧焊是属于熔化焊的一种，它主要有手工电弧焊、埋弧自动焊和气体保护焊三种方式。

1.4.1.1 手工电弧焊

手工电弧焊的原理是利用焊条与工件产生的电弧热将金属熔化而焊接。在焊接过程中焊条药皮熔化产生气体和熔渣。在气体和熔渣的保护下，有效地排除了周围空气的有害影响，通过高温下熔化金属与熔渣间的冶金反应还原与净化得到优质焊缝。

手工电弧焊的特点是设备简单，操作方便，但劳动强度大，对焊接工的技能要求较高。它适用于内外平、横、立、仰多种位置的焊接。可以焊接碳钢、低合金钢、耐热钢、低温钢和不锈钢等各种材料。

手工电弧焊的焊接工艺规范主要是焊接电流、焊条直径和焊接层次。从提高效率考虑应选用大电流和粗焊条，但实际上应根据板厚、焊接位置和线能量要求等因素选择焊接电流和焊条直径。焊条直径和工件厚度的关系见表 2.17-26。

表 2.17-26 焊条直径和工件厚度关系

工件厚度 (mm)	焊条直径 (mm)
<4	2.5~3.2
4~12	3.2~4
>12	>4

1.4.1.2 埋弧自动焊

埋弧焊是当今生产效率较高的机械化焊接方法之一。它的全称是埋弧自动焊。在焊剂层下，自动埋弧焊的电弧是掩埋在颗粒剂下面的，当焊丝和焊件之间引燃电弧，电弧使焊件、焊丝和焊剂熔化以致部分蒸发，金属和焊剂蒸发气体形成一个封闭的空腔，电弧就在这个空腔中稳定燃烧，焊丝不断以熔滴状落入熔池，与熔化的母材金属混合形成焊缝。埋弧焊时熔化的大量焊剂对熔池金属起还原、净化和合金化作用。而密度较轻的熔渣浮在熔池表面，有效地保护熔池金属。它的特点是焊缝美观、质量好、少飞溅；劳动强度低；劳动条件好，没有光辐射；节省材料和电能；易实现生产过程机械化与自动化。主要用于碳钢、低合金钢、不锈钢和紫铜等中、厚板的长焊缝焊接。焊接参数有焊接电流与电弧电压、焊丝直径与伸出长度、焊丝或工件倾斜角度等。

1.4.1.3 气体保护焊

气体保护焊简称“气电焊”。保护气体从喷嘴中以一定速度流出，把电弧、熔池与空气隔开，杜绝其有害作用，以获得性能良好的焊缝。常见的气体保护焊可分为非熔化极（钨极）气电焊和熔化极气电焊。前者主要用于薄板，后者常用于厚度大于 2mm 的薄板和中厚板焊接。

气体保护焊的优点：①电弧可见，焊接时对中容易；②电弧受气流压缩而热量集中，热影响区较窄，焊件变形较小；③电弧气氛的含氢量较易控制，可减小冷裂缝倾向；④适合焊接钢铁及各种非铁金属。

常见的保护气体有二氧化碳和氩气。

（1）二氧化碳（CO₂）保护气体焊主要用于碳钢及低合金钢的焊接。优点是：①生产率高。CO₂ 电焊的穿透力强，熔深大，而且焊丝的熔化率高，所以熔敷速度快，生产率可比手工电弧焊高 1~3 倍。②抗锈能力强。焊缝含氢量低、抗裂性好。③焊接成本低。由于 CO₂ 气体价格低，其成本只有埋弧焊和手工电弧焊的 40%~50%。④能耗低。与手工电弧焊相比，电能消耗可以节约 30%。⑤适用范围广。不论任何位置均可焊接，薄板可焊到 1mm，变形小，厚度不受限制。⑥焊后不需清渣，又因是明弧，便于监视和控制，有利于实现焊接过程的机械化和自动化。它的缺点是大电流焊接时，焊接表面成型差，飞溅较多。不同焊接材料采用的焊丝牌号见表 2.17-27。

表 2.17-27 CO ₂ 气体保护焊常用焊丝牌号及用途	
焊丝牌号	用 途
H10MnSi	焊接低碳钢
H08MnSi	焊接低碳钢
H08MnSiA	焊接低碳钢
H08Mn2SiA	焊接低碳钢及某些低合金高强度
H08Mn2SiTiA	焊接低碳钢及某些低合金高强度
H10MnSiMo	某些低合金高强度
H08MnSiCrMo	某些低合金高强度
H08Cr3Mn3MoA	焊接贝氏体钢

（2）氩弧焊可用于焊接碳钢、低合金钢及各种非铁金属。特点是：①氩气是惰性气体，与金属不起反应，不会造成元素的氧化烧损；氩气也不溶于液态金属而生成气孔，故氩气保护性能优良。②氩气的热容量小和导热性差，弧极区容易保持在高温状态。所以氩弧一旦引燃就能在较低的电压下稳定燃烧，而且飞溅少，焊缝表面成型好，具有较好的机械性能。③氩气不易电离，引弧要求有较高的电压。④直流

反极性钨极氩弧焊时，发生阴极雾化现象。利用此现象可以焊接铝、镁等金属。

1.4.2 激光焊

激光焊的符号为 RJG，激光焊是将光能转变为热能而进行焊接的，它是利用经聚焦后的高功率密度（10⁶~10¹² W/cm²）的激光束为热源的特种熔化焊接方法。激光焊按激光器的工作方式，可分为脉冲激光点焊和连续激光焊两种。

激光焊特点是：①焊缝周围热影响区十分狭窄。脉冲激光焊接时，能量密度大，焊接所用时间极短，冷却速度较快，因而热影响区极小，且焊缝干净，组织细小，所以焊缝强度高，变形小。②与真空电子束相比，它不产生 X 射线，不受真空条件的限制。激光点焊用于异种金属材料的焊接有较大的进展。特别是对石英、陶瓷、玻璃、塑料等非金属材料的焊接也已成为可能。③可以焊接很薄很细的（其物理性质不限）小零件，如脉冲激光点焊可用于厚度 0.5mm 以下的金属丝材的焊接。④激光辐射可透过玻璃或其他透明物质向被焊接工件输送能量，从而进行焊接。⑤可以进行其他方法难以连接的部位上焊接。

1.4.3 电子束焊

电子束焊的符号为 RDS。电子束焊是在真空室内，从炽热阴极发射的电子，被高压静电场加速，然后经电磁场聚集成高能量密度的电子束（通常电子束径约 0.25~0.75mm，能量密度约 1.5×10⁵ W/cm²），在焊件的轰击点处与材料晶格电子、原子相撞击时被散射和阻止，其动能变为晶格振动能（热能）而使焊件熔化。在高能量密度下，电子束则穿入到材料的内部，其过程是在电子轰击下，材料瞬间内熔化并蒸发，强烈的金属蒸汽流将部分液相排出电子束作用区，电子束在其内部再聚集，形成细深的被液相包围的空腔。焊件移动时，液相金属从熔化区空腔周围脉动式地向结晶区过渡，并有少量金属被排在焊件表面上，凝固冷却后形成深而窄的焊缝。

1.4.4 电阻焊

电阻焊是将被焊工件压紧于两电极之间，并通以电流，利用电流流经工件接触面及邻近区域产生的电阻热将其加热到熔化或塑性状态，使之形成金属结合的一种方法。电阻焊的方法主要有四种，即点焊、缝焊、凸焊和对焊。

1.4.4.1 点焊

点焊是一种高速、经济的连接方法。它适用于制造可以采用搭接、接头不要求气密、厚度小于 3mm 的冲压、轧制的薄板构件。

（1）接头型式及点焊结构。最常见的点焊接头是板材的搭接和卷边接。另外，圆棒与圆棒、圆棒与板材的点焊也较常用。用通用式点焊机及简单夹具点焊时，焊件结构设计要遵循下列几点原则：

- 1) 伸入焊机回路内的铁磁体工件或夹具的断面应尽可能小，且在焊接过程中不能剧烈地变化，带折边的结构在焊接时，须套在机臂上的箱形结构更合理。
- 2) 尽量采用具有强烈水冷的通用电极进行点焊。
- 3) 可用任意顺序来焊接各焊点，易于防止变形。
- 4) 焊点离工件边缘的距离不应太小。
- 5) 焊点不应布置在难以形变的部位。

（2）焊接工艺。

1) 焊前表面准备。点焊时，电压低、电流大、阻抗小。焊件表面的油污、氧化膜将直接影响接触电阻的大小、熔核的形成和电极寿命，使接头强度和生产效率降低。所以焊前十分关键的工序是清理焊件表面的油污、氧化膜等。常用方

法有两类：机械清理与化学清理（见表 2.17-28）。

表 2.17-28 焊前表面清理方法及特点

分类	方 法	特 点
机械清理	旋转细丝刷，金刚砂毡轮抛光，喷砂喷丸	设备简单，但劳动条件差，生产率低，清理质量不稳定，焊件表面易划伤，允许存放时间较短
化学清理	去油、酸洗、钝化	用于成批或氧化膜较厚的黑色金属，生产率高，质量稳定，存放时间较长

2) 点焊的分类。按照电极供电方向和在一个点焊循环中所能形成的焊点数，点焊分为单面点焊、双面点焊、单点焊、双点焊、多点焊。此类点焊方法的特点和应用范围见表 2.17-29。

表 2.17-29 点焊的分类方法

分类	特 点	适 用 范 围
双面单点焊	压力足够大，电流集中，质量可靠	两个电极允许并能够直接从焊件上、下两面接近焊件的点焊结构
单面双点焊	生产率高，能焊尺寸大、形状复杂和难以双面单点焊的焊点	主要用于难以双面单点焊的焊接结构
单面单点焊	两个电极安放在焊件的同一面，其中一个电极工作面的尺寸很大，仅起导电作用	主要用于不能采用双面单点焊的结构
双面双点焊	在一次点焊循环中，同时形成两个焊点；分流小，电极力的使用不受工件刚性的限制，焊接质量高	主要用于厚度较大，质量要求较高的大型部件焊接
多点焊	将工件压紧后焊接多个焊点，生产率极高	用于大量生产中

3) 点焊规范。点焊的主要规范参数有焊接电流、焊接时间、电极压力、电极工作端面的形状和尺寸等。具体规范参数在下面常用材料点焊中介绍。

(3) 常用金属材料点焊。

1) 低碳钢点焊。交流点焊机通常用于焊接 0.25~6.0mm 厚的冷轧或热轧钢材，大于或小于此厚度的钢板须用特殊的点焊机和特殊的工艺。

2) 低合金钢的点焊。焊接含碳量大于 0.2% 的碳钢和含碳量大于 0.12% 的低合金钢有下列困难：焊点硬度高、塑性低；易形成热裂纹。

低合金钢点焊可采用下面三种工艺方法：①软规范焊接，即小电流、长时间、减小熔核凝固速度，以防止热裂纹的产生。②双脉冲规范，即第一次电流脉冲是以形成所需尺寸的熔核，而第二次电流脉冲应为第一次脉冲的 70%~80%，以使熔核在凝固时受到补充加热，因而降低了凝固速度，增强了电极力的压实效果，从而免除了裂纹形成。③电极间热处理的点焊，同样采用双脉冲规范，不过两脉冲的间隙时间较长，第一次脉冲加热并冷却后产生淬火效应，第二次脉冲加热并冷却后产生回火效应。

3) 镀层钢的点焊。低碳钢可采用热浸、电镀或其他方法镀一层耐蚀金属或合金（如锌、铝、锡和锡—锌）。这些镀层也可采用点焊，其特点见表 2.17-30。

表 2.17-30 镀层钢点焊特点

钢 种	点 焊 特 点
镀锌钢	尽量避免采用单面双点焊，推荐用平面电极，电极用 ISOA 组 2 类电极合金，电极锥角为 120°~140°，电极头直径取两焊件中薄件厚度的 4~5 倍，焊接时电极必须有强烈的水冷。同低碳钢相比，焊接时间应增加 25%~50%，焊接电流应增加 50%，电极力应增加 10%~25%
镀铝钢	推荐用 ISOA 组 2 类电极合金制成的球面电极。对厚度不大于 0.6mm 的钢板电极头球半径为 25mm；对厚度不小于 0.6mm 的钢板电极头球半径为 50mm。在预定数量的焊点焊完后，电极须采用 160 目或 240 目氧化铝的砂布进行修整，焊接时焊接电流、焊接时间和电极力大致等于或稍高于没有镀层的低碳钢所采用的参数
镀锡和镀锡锌钢	与点焊无镀层低碳钢相比，对焊机性能的要求较严格，推荐采用低惯性机头的焊机，电极可采用 ISOA 组 2 类电极合金制成的锥形平面电极，锥度 120°，直径为焊件中薄件厚度的 4~5 倍。焊接时间稍短、电流适当、电极力足够大（约 70MPa）

4) 不锈钢与高温合金：

不锈钢。可采用小电流或短时间点焊，但需提高电极力。推荐采用 ISOA 组 3 类电极合金作电极，对 18 铬铁素体不锈钢宜采用短时间加热规范；12 铬马氏体类不锈钢应采用回火规范以提高接头塑性。

高温合金。焊接电流可减小，但须增大电极压力，有时采用阶梯压力，并注意电极表面清理。

5) 铜及铜合金。铜及铜合金的焊接取决于其物理性质和化学成分，导电性愈好，点焊愈困难。与焊接同厚度的低碳钢相比，所需电流要增大 50%，而焊机功率要增大 100%。复合电极点焊黄铜的规范见表 2.17-31。0.9mm 厚的各种铜合金板点焊规范见表 2.17-32。

表 2.17-31 黄铜点焊规范

板 厚 (mm)	焊接电流 (kA)	电极力 (N)	焊接时间 (周)	焊点拉剪力 (N)
0.4	8	600	5	1000
0.6	9	800	6	1200
0.8	9.5	1000	8	2000
1.0	10	1200	12	3000

表 2.17-32 0.9mm 厚的各种铜合金板点焊规范

牌 号	名 称	电极力 (N)	焊接时间 (周)	焊接电流 (kA)
H85	85 黄铜	1820	5	25
H80	80 黄铜	1820	5	24
H70	70 黄铜	1820	4	23
H60	60 黄铜	1820	4	22
H59	59 黄铜	1820	4	19
QSn7-0.1	7-0.2 锡青铜	2320	5	19.5
QAl10-3-1.5	10-3-1.5 铝青铜	2320	4	19
QSi1-3	1-3 硅青铜	1820	5	16.5
QSi3-1	3-1 硅青铜	1820	5	16.5
HMn58-2	58-2 锰黄铜	1820	5	22
HA177-2	77-2 铝黄铜	1820	4	22

(4) 不同厚度、不同材料点焊。

1) 不同厚度焊件点焊方法：

a. 采用电流大、通电时间短、焊接接合点电流密度高

的规范。

b. 为减小薄件侧散热的影响,提高薄件侧的电流密度,在薄件侧采用小直径电极,从而减小熔核偏移量。

c. 从平衡两电极散热角度出发,可在薄件侧采用热导率较低的电极,或增加从电极端面至冷却水底部的距离。

d. 在薄件侧放置导热性较差的工艺垫片或冲工艺凸点,以降低薄件的散热或增大薄件一边的电流密度。垫片材料及厚度要根据薄件厚度及材料性质而定,一般用厚度 0.2~0.3mm 薄箔。不锈钢箔可用于焊接铜或铝合金,坡莫合金箔可用于焊接高温合金。使用垫片调整核心偏移时,规格不要过大,以免垫片黏在焊件表面。

e. 利用直流电的物理效应,如焊接铝合金时常用直流焊机,在电流足够大时可发现熔化核心偏向极性相对为正的电极,这便是帕尔帖效应的影响。

2) 不同材料点焊。当点焊具有不同物理性质的非同种金属时,须采取下列措施:

a. 在导热性和导电性较差的金属侧放置接触面直径较大或球半径较大的电极。

b. 在导热性和导电性较好的金属与电极接触处放垫片。

c. 采用硬规范焊接电流及电极力可根据导热性和导电性较好的金属选择。但其他焊接规范的选择,要考虑焊接性较差的金属所起的变化。

当黑色金属与轻合金或铜合金点焊时,焊点可能很脆。为提高焊点的塑性,可在两焊件间夹一层第三种金属,使与两种金属均能很好地焊接。例如,低合金钢与纯铝点焊时,只要在钢表面预先电镀上铜或银,就可得到塑性高的焊点;又如低碳钢与黄铜点焊时,在钢表面预先镀上一层锡。

如被焊两金属的物理性质悬殊,且厚度又相差较远,则在电容储能式点焊机上可焊出满意的点焊接头,虽然两工件的熔深都不大,但都均匀焊透。

(5) 电容储能点焊原理及特点。

1) 电容储能点焊原理。电源由三相交流电网供电,经三相全波整流后,再对电容器 C 进行充电。焊接时,晶闸管 VT 导通,电容器 C 对焊接变压器 T 一次绕组放电,在二次绕组获得所需要的焊接电流。S 为换向开关,使导通电流变换方向,防止变压器单向通电而磁饱和。VD 为整流二极管。

焊接时储存的能量 W_c 与电容量 C、充电电压 U_c 有关,可按式 (2.17-1) 计算

$$W_c = (CU_c^2)/2 \quad (2.17-1)$$

式中: C 为电容器的电容量, F; U_c 为电容器充电电压, V。

为增大释放的能量,可加大电容量或提高充电电压,但这样会使电容器组增大,同时提高了对安全用电的要求。

调节充电电压 U_c 、电容量 C 和变压比 k,便可改变放电时间或电流波形的高度与幅值,因而改变了加热(冷却)速度或总能量的大小。

2) 电容储能点焊电源特点:

a. 优点有: ①电容储能三相电源负荷均匀,功率因数较高,没有交流过零点间歇时间,加热集中,焊接质量稳定。②电源可调性好,适用于焊接物理性能相差很远或厚度比相差很大的零件,表面质量好,变形小。

b. 缺点是设备成本较高,放电时间不能控制,不易维持长时间焊接电流,功率有限。

c. 适用于焊接碳钢、不锈钢、高温合金和有色金属等精、细、薄件,厚度范围为 0.1~0.5mm。

1.4.4.2 缝焊

缝焊是用一对滚轮电极代替点焊的圆柱形电极,与工件作相对运动,从而产生一个个熔核相互搭叠的密封焊缝的焊接方法。

(1) 缝焊方法。按接头型式分,缝焊可分为搭接缝焊、压平缝焊、垫箔对接缝焊、铜线电极缝焊等。搭接缝焊同点焊一样,搭接接头可用一对滚盘或用一个滚盘和一根芯轴电极进行缝焊。接头的最小搭接量与点焊相同。

(2) 缝焊工艺。缝焊接头的形成本质上与点焊相同,因而影响焊接质量的诸因素也是类似的。缝焊工艺参数主要有焊接电极压力、焊接时间、休止时间、焊接速度和滚轮的直径和宽度等。根据被焊金属的性能、厚度、质量要求和设备条件来选择缝焊工艺参数,通常可参考已有的推荐数据初步确定,再通过工艺试验加以修正。

1.4.4.3 凸焊

凸焊主要用于焊接低碳钢和低合金钢的冲压件。凸焊的种类很多,除板件凸焊外,还有螺母、螺钉类零件的凸焊,线材交叉凸焊,管子凸焊和板材 T 形凸焊等。

板材凸焊最适宜的厚度为 0.5~4mm。焊接更薄的板件时,凸点设计要求严格,需要随动性极好的焊机,因此厚度小于 0.25mm 的板件更适宜采用点焊。

凸焊与点焊相比具有以下优点: ①在一个焊接循环内可同时焊接多个焊点,不仅效率高,且不受焊点间距限制。②由于电流密集于凸点,电流密度大,故可用较小的电流进行焊接,并能可靠地形成较小的熔核。③凸点的位置准确、尺寸一致,各点的强度比较均匀。④由于采用大平面电极,且凸点设置在一个工件上,所以可最大限度地减轻另一工件外露表面上的压痕。同时大平面电极的电流密度小、散热好,电极的磨损要比点焊小得多。⑤与点焊相比,工件表面的油、锈、氧化皮、镀层和其他涂层对凸焊的影响较小。

凸焊的不足之处是需要冲制凸点的附加工序;电极比较复杂;若一次要焊多个焊点,需要使用高电极压力、高机械精度的大功率焊机。

1.4.4.4 对焊

对焊(对接电阻焊)是利用电阻热将两工件沿整个端面同时焊接起来的一类电阻焊接方法。

对焊的生产效率高,易于实现自动化,因而获得广泛的应用。其应用范围如下: ①工件的接长。如型材、线材、管道的对焊。②环形工件的对焊。如各种轮圈、链环的对焊。③部件的组焊。将简单轧制、锻造、冲压或机加工件对焊成复杂零件,以降低成本。④异种金属的对焊。可以节约贵金属,提高产品性能,如铝铜导电接头的对焊。

对焊可分为电阻对焊和闪光对焊两种。

1.4.5 钎焊

钎焊是将焊件和钎料(填充材料)共同加热到钎焊温度,在钎焊工件不熔化的情况下,熔化的液态钎料润湿并填满接合面的间隙,依靠液态钎料和固态焊件之间相互扩散而形成金属间的牢固连接。

钎焊原理是利用液态钎料填满钎焊金属接合面的间隙而形成牢固接头,其工艺过程必须具备两个基本条件: ①液态钎料润湿钎焊金属,致密地填满全部间隙; ②液态钎料与钎焊金属进行必要的冶金反应达到良好的金属结合。

钎焊与熔焊相比,有下列优点: ①钎焊时焊件不熔化,根据所选用的不同钎料合金,钎焊的温度可从室温直至接近焊件金属熔点的宽广范围内选取。在多数情况下,钎焊温度都比焊件金属熔点低得多,因此,钎焊后工件组织和机械性

能变化较小，应力及变形小，不致产生像熔化焊接头中的裂纹、气孔等缺陷。②可以钎焊任意组合的金属材料，可以钎焊金属与非金属（陶瓷、石墨等）。③可以一次完成多个零件的钎焊或套叠式、多层式结构焊件的钎焊。④可以钎焊极细极薄的零件，也可以钎焊厚薄及粗细差别很大的零件。⑤可以将某些材料的钎焊接头拆开，重复进行钎焊。钎焊的不足之处是：①钎焊接头的强度较熔焊低，因此常用搭接头的方式来提高承载能力；②钎焊工件连接表面的清理工作和工

件装配质量要求都很高。
1.4.5.1 钎焊方法及应用
钎焊方法大约有六种，其工艺要点和适用范围见表 2.17-33。
1.4.5.2 焊前焊件的清洗和装配
钎焊前焊件的表面处理包括去油、除氧化膜及镀覆镀层，见表 2.17-34。

表 2.17-33 钎焊方法的工艺要点和适用范围

序 号	名 称	工 艺 要 点	特点和适用范围
1	火焰钎焊	利用可燃气体的高温火焰进行加热钎焊。氧—乙炔火焰钎焊是常用的方法，火焰温度高达 3000℃ 以上。由于钎料熔点一般不超过 1200℃，为使钎焊头加热均匀，并防止钎焊金属和钎料氧化，应采用中性焰或碳化焰外焰加热	适用于铜锌、铜磷、银基、铝基钎料等钎焊碳钢、不锈钢、硬质合金、铸铁、铜及铜合金、铝及铝合金等。其特点是所用设备简单、操作灵活、燃气来源广，但手工操作生产效率低、操作技术要求高
2	电阻钎焊	电阻钎焊时采用箔状钎料最适宜，直接置于焊件之间，若使用钎料丝，可放置在钎缝间隙旁，或待钎焊面加热到钎焊温度时添加。直接加热电阻钎焊时，钎剂应调成糊状，或用酒精配成溶液，最理想的是采用自钎性钎剂	电阻钎焊是依靠电流通过焊件的钎焊部位所产生的电阻热，及电极自身通电后产生的电阻热量来加热焊件和熔化钎料，并施加一定压力来进行焊接的。目前常用的发热电极材料为铜钨合金、钼、钨合金等。电阻钎焊常用的焊机有 DN-25、DN-63 等
3	炉中钎焊	利用电阻加热炉加热焊件来进行，根据焊件的保护方式不同分为空气炉中钎焊、保护气氛炉中钎焊及真空炉中钎焊	空气炉中钎焊时，使用一般工业电阻加热焊件到钎焊温度，依靠钎剂去除氧化膜。其优点是加热均匀，焊件变形小，设备简单，投资少，可以一次钎焊多个焊件；其缺点是加热速度较慢，焊件表面氧化较严重
4	感应钎焊	利用金属零件在感应圈交变磁场中产生感应电流，而得到电阻热来进行加热钎焊。按照电源频率的不同分为高频、中频和工频感应钎焊。工频感应钎焊很少用于钎焊。常用的是高和中频感应钎焊	其特点是加热快、效率高，可进行局部加热，且容易实现自动化
5	浸沾钎焊	将焊件浸入熔融的高温液体介质中加热来进行钎焊。浸沾钎焊分为盐浴钎焊、熔化钎剂中钎焊和熔化钎料中钎焊。盐浴钎焊所用的盐只是作为导热介质，钎焊时须另加钎剂以去除氧化膜	由于浸沾钎焊介质热容量大，导热好，因而具有加热迅速、温度均匀、焊件变形小等优点。但是浸沾钎焊耗电多，溶盐蒸气污染严重，劳动条件较差。而盐浴钎焊适合于用铜基、银基钎料钎焊碳钢、合金钢、高温合金、铜及铜合金等。常用的盐浴炉有插入式电极盐浴炉和坩埚式

表 2.17-34 钎焊前焊件的清洗和装配的工艺要点

序 号	工 艺 名 称		工 艺 要 点
1	钎焊件表面去油	有机溶液去油	常用的有机溶剂有三氯乙烯、汽油、丙酮、四氯化碳等，最常用的是汽油和丙酮。三氯乙烯效果最好，但毒性大。先用汽油擦去焊件表面的油污；再在三氯乙烯中浸洗 8~10min 后擦干；然后在无水乙醇中浸泡；再在碳酸镁水溶液煮沸 3~5min；最后用水冲洗，用酒精脱水烘干。用丙酮去油的过程是：先用汽油浸泡除油，再用丙酮洗涤，然后吹干
		碱溶液去油	铜及铜合金、低碳钢、低合金钢、不锈钢、镍及镍合金、钛及钛合金等材料，可放在 80~90℃ 的 10%NaOH 水溶液中浸洗 8~10min。而铝及铝合金可放在 70~80℃ 的 Na ₃ PO ₄ （50~70g/L）、Na ₃ SiO ₃ （25~50g/L）、肥皂（3~5g/L）的水溶液中浸洗 10~15min，而后用清水冲洗，用酒精脱水并烘干
2	氧化膜化学清理		采用化学方法清理焊件表面氧化膜是生产中最常用的，只有数量少、结构简单的钢、铜合金或镍合金等零件才采用喷砂、喷丸、砂纸擦或钢丝刷擦的机械清理方法。钎焊零件经去油及清除表面氧化膜后，严禁手或其他脏物触及表面。清洗后的零件，应立即装配钎焊或放在干燥容器内保存。零件组装时，应戴棉布手套
3	焊件表面镀覆镀层		为了改善钎料对某些基体材料表面的润湿性，为了防止焊件材料（如含钛、锆等活泼元素的金属材料）在钎焊过程中被严重氧化，防止钎料与焊件材料形成脆性氧化物，须对焊件表面镀覆镀层
4	焊件装配		钎焊接头的装配间隙过小会妨碍钎料填缝，而间隙过大则会破坏毛细作用，导致钎料不能填满间隙，接头强度降低。装配间隙的大小不但与钎焊金属及钎料的性能有关，而且与焊件形状、尺寸及钎焊工艺有关。一般来说，钎焊金属的线膨胀系数越大，装配间隙也越大。火焰钎焊时，接头的装配间隙通常比炉中钎焊时大些

表 2.17-37 常用金属材料的钎焊

序号	钎焊金属	钎料	钎剂	特点
1	碳钢和低合金钢钎焊	所用的软钎料为：锡、铅和锡铅基钎料。为提高接头强度，也可采用硬钎料钎焊，常用的有铜基、银基钎料	软钎焊时钎剂采用氯化锌水溶液或氯化铵水溶液。用铜基钎料钎焊时，采用硼酸类钎剂或粉 301 钎剂；用银基钎料钎焊时，采用剂 101、剂 102 及剂 104 等	碳钢表面存在 FeO、Fe ₂ O ₃ 等氧化物。低合金结构钢表面除了生成氧化铁外，还可能产生合金元素的氧化物。但除了铬和铝氧化物影响较大外，其他氧化物是较易被还原和清除的
2	不锈钢钎焊	根据不锈钢焊件的用途、钎焊温度、接头性能等不同，可采用锡铅软钎料或铜基、银基、镍基、锰基、贵金属硬钎料	不锈钢中大量的铬会形成稳定的氧化，因此需要采用活性极强的钎剂。软钎剂可用氯化锌加盐酸溶液、氯化锌和氯化铵加盐酸溶液、磷酸加磷酸盐溶液	不锈钢中含有铬、钼、钛、镍等合金元素，表面氧化膜的组成复杂，其中以铬和钛的氧化物化学稳定性最好。因此，必须采用活性很强的钎剂、露点很低的保护气体或真空钎焊方法
3	铜及铜合金钎焊	软钎焊时采用锡铅、锡基、锌基钎料，硬钎焊时采用铜基、铜磷银、银基钎料，可根据焊件结构、性能和用途选择	软钎焊铜及铜合金时，采用氯化锌加盐酸溶液等钎剂。硬钎焊铜及铜合金时，黄铜钎料配用硼砂硼酸类、粉 301 等钎剂，银钎料或含磷钎料配用剂 101、剂 102 钎剂	铜及铜合金表面氧化膜主要是 Cu ₂ O 和 CuO，还有一些合金元素的氧化物。这些氧化物的化学稳定性较差，容易被还原清除，因此几乎所有钎焊方法都可采用
4	铝及铝合金钎焊	软钎焊时，如用锌基、锡基钎料，接头耐腐蚀性较差，强度也低，改用硬钎焊可提高接头强度和耐腐蚀性	钎焊铝及铝合金用的硬钎剂主要由氯化物、氟化物组成。钎焊后的残渣必须清除干净，否则接头在以后的使用中易腐蚀	铝及铝合金的表面氧化物化学稳定性很好，不易清除，必须采用活性极强的钎剂或真空钎焊等方法

1.4.6 全位置焊接机器人及专用焊接设备简介

1.4.6.1 全位置自动焊接设备（焊接机器人）

随着工业化大批量生产的需要，现代电器制造业中自动化技术越来越多地得到应用，国内有些技术力量雄厚的科研技术部门已经能完成弧焊全位置自动焊接设备（焊接机器人）的制造。转轴自动焊接工作站就是一种自动焊接设备。它具有以下特点：

- (1) 易于实现焊接产品质量的稳定和提高，保证其均一性。
- (2) 提高生产效率，一天可 24h 连续生产。
- (3) 改善工人劳动条件，可在有害环境下长期工作。
- (4) 降低对工人操作技术难度的要求。
- (5) 缩短产品改型换代的准备周期，减少相应的设备投资。
- (6) 可实现大批量产品的焊接自动化。

转轴自动焊接站的基本原理：人工将转轴的各零件装在相应品种的工装夹具上，然后按下相应工位的按键，实现全自动焊接。

焊接工作站的主要组成及功能：转轴焊接工作站由弧焊机器人、机器人控制系统、变位机、系统控制柜、工装夹具、电焊机等组成。其中机器人控制系统主要是为了实现机器人运行轨迹、编辑焊接程序、设置焊接工艺参数等功能，并且为系统控制柜提供机器人的各种状态信号；系统控制柜主要实现变位机的各种动作，并且负责对机器人高层控制，管理两者之间的信号；变位机实现各工位的装卸、焊接时的位置；工装夹具是对产品进行定位。

另外，焊接机器人焊接过程中，送丝过程和气体保护结构类同于熔化极气体保护焊，通常为了保证全位置焊接的焊接质量，一般采用 Ar 气，或 Ar 和 CO₂ 的混合气体作为保护气体（CO₂ 所占比例约为 5%~20%）。

1.4.6.2 专用焊接设备

现代电器制造业中，专用焊接设备得到越来越广泛地应用，自动化或半自动化的专用焊接设备，被用于一些电器的编织线焊接，及产量大的中小容量电器触头的焊接工序中，特别是小容量的接触器、继电器及断路器触点的焊接，目前这些用于块状触头的专用焊接设备很多，但主要的原理结构都类同于瑞士公司制造的 OAD11/20/70 八工位转盘式自动焊机，这些设备的控制系统及驱动系统中，广泛应用了一些光电传感器、磁性开关等科技含量较高的电气元件，设备本

身可以根据焊接触头面积的大小，在自身额定容量的范围内，可调节输出的电极电压，其工作原理如下：

- I 工位：人工放置触桥或触座，弹簧定位。
 - II 工位：检查触桥位置是否正确，前一循环焊接的触头是否已取下，否则发出停机指令。
 - III 工位：检查有无漏放触桥，如漏放即发出停机指令。
 - IV 工位：自动注射焊剂。
 - V 工位：焊接振动料斗将块状触头送至料槽末端，机械手持触头放置触桥上，自动焊机上下电极夹紧、焊接。
 - VI 工位：检查焊接质量，如不合格便自动分选剔除。
 - VII 工位：机械手取下工件（焊好的触头部件），放入储料箱。
 - VIII 工位：清理，将夹具上的残留焊剂杂物清理干净，为下一焊接循环做好准备。
- （德国 RM 公司采用超声波焊接质量检测装置，对触头焊接质量进行无损伤检测。）

1.5 固态电器制造工艺及 SMT

1.5.1 表面安装技术的发展趋势与应用

表面安装技术（SMT）通常是将具有表面安装特性的电子元器件（SMD/SMC）经自动贴装设备安装在印制电路板表面或其他基板的表面的一种装联技术。SMT 是伴随着现代制造技术集成化出现的新的装联技术。它区别于插装技术（THT），起源于传统的工艺技术——扁平封装和混合电路。20 世纪 80 年代，由于表面安装设备的逐步成熟，表面安装技术得到了广泛的应用，如在收音机、电视机、录像机等消费产品中大量使用了 SMT。特别进入 20 世纪 90 年代以后，由于元器件封装形状的不断缩小以及组装设备的成熟，SMT 在各行各业（如通信产品、电器产品）中均得到了大量的应用。SMT 作为新一代电子装联，已经广泛应用于各个领域，SMT 发展迅速，在许多领域中已经或完全取代传统的电子装联技术，SMT 以自身的特点和优势，使电子装联技术产生了根本的、革命性的变革。SMT 不仅在电子行业，而是在我国多种行业中得到了广泛的应用。随着应用的加深，SMT 也有了进一步的发展。

1.5.1.1 SMT 设备的发展

表面安装技术中，SMT 设备的更新和发展代表着表面

安装技术的水平,面向新世纪的 SMT 设备将向着高效、柔性、智能、环保方向发展。

(1) 高效的 SMT 设备。高效的 SMT 设备在向改变结构和提高性能的方向发展:结构向双路送板模式和多工作头、多工作区域发展。

在性能上贴片机向高速、高精度、多功能和智能化方向发展。

(2) 柔性模块化的 SMT 设备。新型贴片机为了增强适应性和使用效率向柔性贴装系统和模块化结构发展。

(3) 环保型的 SMT 设备。随着人们对环保要求的不断提高,一些环保型的 SMT 设备随之出现,如某公司的 NP133E 采用立式旋转头设计,实现了较低的噪声。ERSA 新型的波峰焊接机装置了一个在惰性气体环境内工作的超声波系统,以取代助焊剂装置。

1.5.1.2 SMT 封装元器件及工艺材料的发展

(1) SMT 封装元器件的发展。SMT 封装元器件主要有表面安装元件(SMC)、表面安装器件(SMD)和表面安装电路板(SMB)。SMC 向微型化大容量发展,最新 SMC 元件的规格为 01005。在体积微型化的同时其容量向大的方向发展。SMD 向小体积、多引脚方向发展,SMD 经历了由大体积少引脚向大体积多引脚的发展。现在已经开始由大体积多引脚向小体积多引脚的发展。如 BGA 向 CSP 的发展。倒装片(FC)应用将越来越多。SMB 则向多层、高密度、高可靠性方向发展,随着电子装联向更高密度的发展,许多 SMB 的层数已多达十几层以上,多层的柔性 SMB 也有较快的发展。

(2) SMT 工艺材料的发展。SMT 工艺材料常用的包括:条形焊料、膏状焊料、助焊剂、稀释剂和清洗剂等。其助焊材料是向免清洗方向发展,焊料则向无铅型、低铅、低温方向发展,总的方向是向环保型材料方向发展。

1.5.1.3 SMT 的特点

SMT 具有体积小、质量轻、密度高、功能强、速度快、可靠性高等优点,改变了传统的通孔工艺技术。SMT 较传统的通孔插装技术(THT)具有如下特点:

(1) 组装密度高、电子产品体积小、质量轻。贴片元件的体积和质量只有传统插装元件的 1/10 左右,一般采用 SMT 之后,电子产品体积缩小 40%~60%,质量减轻 60%~80%。

(2) 可靠性高、抗振能力强。由于表面安装技术采用了无长引脚的表面安装元器件,因此大大地改善了抗冲击、抗振动的性能。同时易于对生产工艺的控制,能大大地降低焊点缺陷率。

(3) 高频特性好,减少了电磁和射频干扰。由于引线缩短,表面安装板中寄生无源元件数(不希望要的电感电容元件)低于相应的通孔组装板,从而能减少电磁和射频干扰。

(4) 易于实现自动化,提高生产效率。如通孔安装采用不同自动化插装机(DIP 插装机、径向插装机、轴向插装机、排队机等),而每一台机器都需要调整准备时间。SMT 用一台贴片机可以安装所有类型的表面安装元件,因此,减少了调整准备时间。

(5) 降低成本达 30%~50%。由于采用了体积小的表面安装元器件,线路板的尺寸大大减小,可降低线路板的成本,从上一个特点可看出,SMT 还可以节省设备、能源、人力、时间等。同时维修 SMT 的组装板比通孔组装板更容易一些,可以降低组装板的损伤。

(6) 贴片机比插装机运行更安静,因此有一个比较安静的工作环境。另外,表面安装元器件小,所以需要的仓库面积也小。体积小、质量轻,最终组装板产品的运输、装卸成本也低。

1.5.1.4 采用表面安装技术(SMT)的原因

由于 SMT 具有很多的优点,在各个行业得到了广泛的应用。同时由于下述原因,更加快了 SMT 的发展:

(1) 电子产品追求小型化,以前使用的通孔插件元件已无法缩小。

(2) 电子产品功能更完整,所采用的集成电路(IC)已无通孔元件,特别是大规模、高集成 IC,不得不采用表面贴片元件。

(3) 产品批量化,生产自动化,厂方要以低成本高产量,出产优质产品以迎合顾客需求及加强市场竞争力。

(4) 电子元件的发展,集成电路(IC)的开发,半导体材料的多元应用。

SMT 是一项复杂的系统工程,它涉及材料技术(基板材料、工艺材料)、组装技术(安放、焊接、清洗等)、设计技术、测试技术、标准化、可靠性和质量保证等多种学科的交叉、渗透。我国的表面安装技术起步较晚,尤其是在智能电器中的应用还刚刚起步。

1.5.1.5 SMT 在电器产品中的应用

由于 SMT 是一个新兴的工艺技术,特别是在电器产品中的应用还处于起步阶段,其在实际应用中还存在较多的问题。如工程师们对 SMT 工艺、生产、设计等方面的经历很少,以致在设计产品的过程中脱离了 SMT 的设计规则,从而影响到产品的可制造性,使得产品的制造成本上升,合格率降低,甚至会影响到产品的可靠性。因此,以下将对 SMT 的整个过程作一简要的介绍,并针对在 SMT 实施过程中出现的各类问题进行探讨。

1.5.2 SMT 工艺过程简介

1.5.2.1 表面安装的分类

SMT 根据最终表面安装组件的特性,可分成三种主要的 SMT 组件类型:Ⅰ型(全表面安装)、Ⅱ型(混装工艺)、Ⅲ型(单面安装),如图 2.17-45 所示。

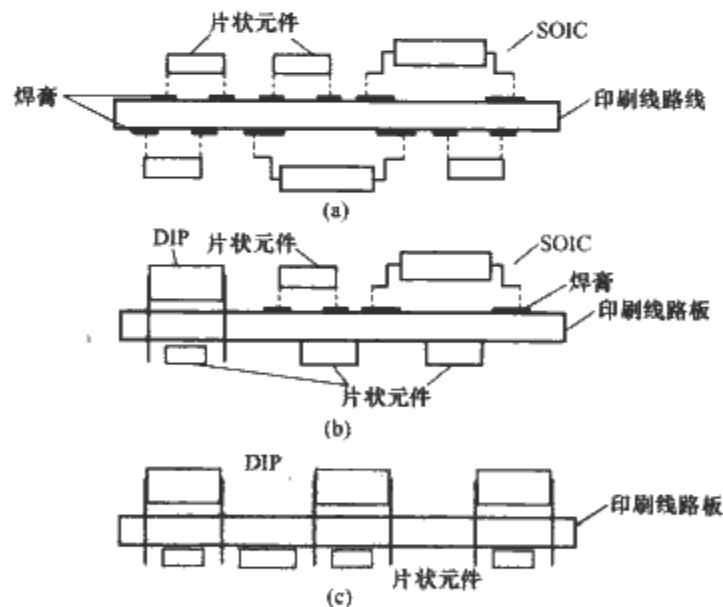


图 2.17-45 SMT 技术中三种基本表面安装组件
(a) Ⅰ型; (b) Ⅱ型; (c) Ⅲ型

Ⅰ型(全表面安装),在线路板上仅有表面安装元件,这种组件可以是单面板、双面板或多层板,通常采用双面回流焊工艺;Ⅲ型(单面安装),仅在线路板的一面贴有 SMC/SMD,另一面为通孔元件;Ⅱ型(混装工艺),是Ⅰ型和Ⅲ型的结合,在线路板的两面均贴有 SMC/SMD,且在一面有通孔元件。

1.5.2.2 SMT 工艺流程

不同的安装方式具有不同的工艺流程,优选的 SMT 工艺流程如表 2.17-38 所示。

表 2.17-38 SMT 优选工艺流程

序 号	名 称	特 点	流 程	备 注
1	I 流程	采用单面、双面或多层 PCB（全部采用表面安装元器件），在元件面贴装，单面焊接（回流焊或波峰焊），简称“单面组装”。这是最简单的全表面安装工艺流程	来料检测→施加焊膏（施加贴片胶）→贴装 SMD→回流焊→清洗→最终检测	
2	II 流程	双面或多层 PCB，双面安装 SMC/SMD、双面焊接，简称双面组装工艺		
	II A 流程	PCB 经过两次回流焊，适用于在 PCB 两面均贴装有不大于 0.8mm 引脚间距 IC，而不宜采用易引起桥接的波峰焊工艺的产品	来料检查→PCB 的 A 面施加焊膏→贴装 SMD→A 面回流焊→清洗（如需要）→翻板→B 面施加焊膏→贴装 SMD→B 面回流焊→清洗（如需要）→最终检测	
	II B 流程	PCB 的 A 面回流焊，B 面波峰焊。在 PCB 的 B 面组装的 SMD 中，只有矩形片状元件、SOT 或不小于 1.0mm 引脚间距 IC 时，可采用这种工艺流程	来料检查→PCB 的 A 面施加焊膏→贴装 SMD→A 面回流焊→清洗（如需要）→翻板→B 面施加贴片胶→贴装 SMD→固化贴片胶→B 面波峰焊→清洗（如需要）→最终检测	
3	III 流程	采用双面 PCB，但在单面混合组装 SMD 和 THD（通孔插装元器件），PCB 经过两次焊接过程。先贴装、回流焊，后插装、波峰焊，无须翻板，简称“单面混装工艺”	来料检查→PCB 的 A 面施加焊膏→贴装 SMD→A 面回流焊→清洗（如需要）→插装通孔插装元器件→波峰焊→清洗（如需要）→最终检测	
4	IV 流程	采用单面、双面或多层 PCB，在双面组装元器件，部分元器件是 SMD，部分元器件是 THD。可在单面焊接，均采用波峰焊方法，如 IV A 和 IV B 流程；也可在双面焊接，采用两种焊接方法。简称“双面混装工艺”		
	IV A 流程	先贴后插，适用于 SMD 数量大于 THD 数量的产品	来料检查→PCB 的 B 面施加贴片胶→贴装 SMD→固化贴片胶→翻板→插装 THD→波峰焊→清洗（如需要）→最终检测	
	IV B 流程	先插后贴，适用于 SMD 数量小于 THD 数量的产品	来料检查→PCB 的 A 面插入 THD（引脚打弯）→翻板→B 面施加贴片胶→贴装 SMD→固化贴片胶→翻板→波峰焊→清洗（如需要）→最终检测	该工艺对机插 THD 比较适合；如果为手插 THD，建议采用 IV A 流程
	IV C 流程	在 PCB 的 A 面贴装 SMD（一般为较大的 SMIC）和 THD，在 B 面贴装 SMD，需两次翻板。先贴装、回流焊，后插装、贴装、波峰焊	来料检查→PCB 的 A 面施加焊膏→贴装 SMD→A 面回流焊→PCB 的 A 面插入 THD（引脚打弯）→翻板→B 面施加贴片胶→贴装 SMD→固化贴片胶→翻板→波峰焊→清洗（如需要）→最终检测	
	IV D 流程	在 PCB 的 A 面贴装 SMD（一般为较大的 SMIC）和 THD，在 B 面贴装 SMD。先贴装两面的 SMD，回流焊，后插装、波峰焊	来料检查→PCB 的 A 面施加焊膏→贴装 SMD→A 面回流焊→翻板→B 面施加贴片胶→贴装 SMD→固化贴片胶→PCB 的 A 面插入 THD→翻板→波峰焊→清洗（如需要）→最终检测	
	IV E 流程	在 PCB 的 A 面贴装 SMD（多为较大的 SMIC），B 面贴装 SMD 和插装 THD。先贴装、回流焊一次，然后再贴装、回流焊一次，最后插装、波峰焊。PCB 共经过三次焊接过程	来料检查→PCB 的 B 面施加焊膏（施加贴片胶）→贴装 SMD→B 面回流焊（贴片胶固化）→翻板→A 面施加焊膏→贴装 SMD→A 面回流焊→PCB 的 A 面插入 THD→波峰焊→清洗（如需要）→最终检测	（1）第二次回流焊，对热敏感的 SMIC（如 QFP），可采用局部回流焊 （2）如果 THD 较少，波峰焊可改用手工焊接

在智能电器控制板的 SMT 实施中,由于必须考虑到智能电器产品内部 PCB 组件的安装空间,下面四类工艺流程在不同的产品中都得到了应用。在 SMT 的实施过程中,必须要认识到回流焊与波峰焊的区别,尤其是作为设计人员在设计 PCB 之前,首先要考虑应采用何种焊接工艺。通常,波峰焊只能焊接矩形片状元件(电阻、电容)、圆柱形元器件、SOT 和引脚间距大于 1mm 的 IC(如 SOP、QFP 等)。而回流焊几乎适用于所有表面安装元器件的焊接。

1.5.2.3 SMT 工艺的实施方法

SMT 工艺控制过程是一项极其复杂的综合工程,由于元器件尺寸、体积很小,IC 的引脚间距不断缩小以及元器件精度的提高,所需要进行 SMT 实施的各种机器的性能也随着得到了提高,其整个工艺实施方法同传统的纯波峰焊有着本质的区别,它不但要面对胶黏剂涂布、焊膏印刷、贴装、回流焊等复杂的工艺过程,而且必须了解元器件、胶黏剂、焊膏、印刷线路板不同的性能,以使得在 SMT 实施过程中对工艺过程参数进行调整。

(1) 胶黏剂涂布。在 SMT 中常用的胶黏剂的使用有针式转移、网印、注射式或压力转移(点胶)等多种方法。应根据实际情况,选择一种合适的方法,胶黏剂涂布时都应遵守以下规则:

1) 胶黏剂从冷藏箱中取出后,须放置 24h,以使其达到室温状态后才能使用。

2) 胶黏剂不应涂布到焊盘上,也不应涂到 SMC/SMD 的电极上。

3) 胶黏剂用量应充足,保证安装元件时,线路板与元件间的大部分空间都充满胶黏剂。

4) 胶黏剂的用量是很关键的,用量过少在波峰焊时易丢失元件,用量过多导致维修问题,或者在元件的压力作用下,胶黏剂流到焊盘上,影响正常的焊接。

5) 胶黏剂的涂布方法不同,对其黏度要求也不同。采用针式转移时,黏度要求控制在 $150\text{Pa}\cdot\text{s}$;采用网印法时,黏度要求控制在 $200\sim 300\text{Pa}\cdot\text{s}$;采用注射法或压力转移时,黏度要求控制在 $70\sim 100\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

(2) 焊膏涂布。在表面安装板的焊接过程中,焊膏被用来将表面安装元件的引线或焊端与焊盘连接起来。将焊膏涂布于表面安装焊盘的方法有网印、漏模板印制和注射式,每种工艺都各有优缺点。常用的涂布方式为漏模板印制。在选择焊膏时必须要考虑焊接后的清洗工艺,影响环境的清洗剂已被禁用,目前常用的焊膏为免清洗型焊膏。在焊膏涂布时应遵循以下规则:

1) 针对不同的涂布方式和不同的产品,应选用不同特性的焊膏。焊膏特性有:金属成分含量、焊料的颗粒尺寸和形状、焊剂的类型、黏度、塌落度、焊膏工作寿命等。

2) 焊膏从冰箱中取出后,须放置 24h,以使其达到室温状态后才能使用;在使用之前应自动或手动将焊膏充分搅拌均匀。

焊膏涂布在焊盘上,应覆盖焊盘的 75% 以上,焊膏的厚度通常为 $100\sim 300\mu\text{m}$ 。

(3) 元件安装。在 SMT 中,元件安装(简称贴片)质量的好坏直接影响焊接质量,通常可采用自动贴片机贴装或手工贴装。手工贴装贴片精度差,速度慢,常用于小批量的生产或新产品试制,而自动贴片机贴片精度高,速度很快,广泛应用于批量生产。

(4) 元件焊接。目前用于 SMT 的焊接主要有波峰焊和回流焊两大类。波峰焊与回流焊的根本区别在于热源和焊料

的来源不同。波峰焊中的热源和焊料是由焊料波同时提供的。由于波峰焊槽的焊锡容量在几十千克以上,因此焊料供应是不受限制的。而回流焊中的焊料是按预定的量涂布到焊盘上,然后在回流焊过程中加热融化焊膏,即回流焊只能提供热能。回流焊的温度比波峰焊要低,因此其焊接时间要长些。回流焊的控制要比波峰焊复杂。

回流焊是一种高效的焊接方式,但它的控制较为复杂,回流焊温度曲线的设定是 SMT 工艺中的重要一环,必须进行多次的调整以达到高的焊接合格率并减少焊接损伤。调节参数包括预热区、保温区、焊接区、冷却区的温度和线路板的传送速度;温度曲线的上升速率、最高温度、焊接时间等,如果调整不当就会对焊接质量产生很大的影响。

再有前面所述的点胶工艺,此时用回流焊炉对胶黏剂进行固化,温度曲线不同于回流焊的曲线,温度要低得多。胶黏剂经过固化后,元件与线路板之间会有大于 12N 的结合力,此结合力使得 SMC/SMD 在经过波峰焊时不会掉到波峰焊炉内。

1.5.3 PCB 的可制造性设计

以前的电子产品,“插装+手焊”是 PCB 的基本工艺过程,因而 PCB 的设计也较为简单。随着表面安装技术的发展,制造工艺逐步溶于设计技术之中,对 PCB 板的设计要求越来越苛刻,越来越需要统一化、规范化。随着智能电器产品的发展,电子产品在其中所占的比重越来越高,表面安装技术在智能电器产品中发挥着愈来愈重要的作用。然而表面安装 PCB 的设计与以往的通孔工艺 PCB 的设计有明显的不同,设计者除了要考虑线路的性能指标之外,更要了解 SMT 的制造工艺,与制造工程师协作,才能设计出符合可制造性要求的 PCB 来。

1.5.3.1 焊接方式考虑

在设计 PCB 之前,设计人员首先要考虑应采用何种焊接工艺。在设计 PCB 时,必须根据焊接工艺要求考虑在印制板的两面应该放置何种元器件,否则在生产中会造成许多问题,甚至无法进行正常生产。

1.5.3.2 PCB 基板的选择

基板,也称为封装和互联的结构件,它在保证电子组装板的电气的、热的和机械的可靠性方面起着重要的作用。所以设计人员在设计之前要很好的了解基板材料及其特性,以及 PCB 的适用场所。下面是设计者在设计之前应考虑的因素。

(1) 热膨胀系数。除了陶瓷基板,几乎所有的层压板都含有聚合物。聚合物在一定温度下主要结构会发生改变,在这一温度下,层压板的物质结构由硬变脆,或似玻璃态再变软呈橡胶态,这一温度称为玻璃化转变温度 T_g 。超过了这一温度,层压板中的树脂会膨胀地很厉害。表面安装元件的组装形态会由于基板受热后的膨胀应力对元件产生影响,若热膨胀系数不同,这个应力会很大,造成元件接合部电极的剥离,降低产品的可靠性,一般元件尺寸小于 $3.2\text{mm}\times 1.6\text{mm}$ 时,只遭受部分应力;但当元件尺寸大于 $3.2\text{mm}\times 1.6\text{mm}$ 时,就必须注意这个问题。

(2) 导热系数的关系。智能电器控制板中大量使用了半导体器件,电器产品的使用场所的温升及半导体器件工作时的发热会对产品的可靠性产生较大的影响。因为半导体 PN 结温度对器件本身可靠性有直接影响,PN 结温度高其可靠性就降低,如温度上升 10°C ,可靠性只有原来的 $1/2$,对于硅芯片元件来说,温度超过 170°C 时,器件也就损坏了。贴装于基板上的集成电路等器件,工作时的热量除了通过自身

表层扩散外，主要是通过基板给予扩散，所以在贴装电路密集，发热量大时，基板必须具有高的导热系数。

(3) 耐热性的关系。由于表面安装工艺要求，一块基板至组装结束，可能会经过数次焊接过程，通常耐焊接热要达到 260℃、10s 的试验要求。其耐热性应符合：150℃、60min 后，基板表面无气泡、无损坏。

(4) 铜箔的厚度与黏合强度。铜箔的厚度也是设计时要考虑的因素，铜箔厚度都是标准化的。铜箔厚度有三种表示方法，通常说的厚度并不是标准化的计量，标准化的计量是单位面积的铜的质量。按照 IEC 标准，分为 152g/m²，305g/m²，710g/m² 等。按照 IPC（或 MTL）标准分为 0.5oz/ft²，1oz/ft²，2oz/ft²（1oz/ft²=305g/m²）等，通常直观的说法是 18μm，35μm，70μm。18μm 对应 152g/m² 或 0.5oz/ft²，35μm 对应 305g/m² 或 1oz/ft²，70μm 对应 710g/m² 或 2oz/ft²。随着印制板布线密度越来越高，高密度、细导线的基材铜箔越来越薄，必须选用 9μm 或更薄的铜箔（铜箔厚度的选择首先依据电流密度）。

由于表面安装元件的焊区比原来带引线元件的焊区要小，因此要求基板与铜箔具有良好的黏合强度，一般要求达

到 0.15MPa 以上。

(5) 弯曲强度。基板贴装后，由于元件的质量和外力作用，基板会产生扰曲，这将给元件和接合点增加应力或者使元件产生微裂，因此要求基板的抗弯强度达到 250MPa 以上。

(6) 电性能要求。由于电路传输速度的高速化，要求基板的介电常数、介电正切要小，同时随着布线密度的提高，基板的绝缘性能要达到规定要求。

(7) 基板对清洗剂的反应。在清洗剂溶液中浸渍 5min，其表面不产生任何不良反应，并具有良好的冲裁性。基板的保存性与 SMD 元件的保管条件相同。

(8) 特殊性能要求。在电器产品中还要考虑到 PCB 基板的耐燃性，它必须具有阻燃或自熄的性能。一般情况选用环氧树脂玻璃布制成的印制板，这种基板的机械性能、尺寸稳定性、抗热冲击都较好，其电器性能优良，工作温度较高，受环境湿度影响小。常用的 FR-4 板工作温度可达到 120℃。表 2.17-39 所示为基板材料的选择准则，表 2.17-40 所示为印制电路板基材的选用指南（参考）。

表 2.17-39 基板材料的选择准则

设计参数	材 料 特 性								
	转化温度	材料的 CTE	热传导性	抗张模数	弯曲率	介电常数	体积电阻率	表面电阻率	吸湿性
温度和功率循环	×	×	×	×					
振 动				×	×				
机械冲击				×	×				
温度与湿度	×	×				×	×	×	×
功率强度	×		×						
芯片载体尺寸		×		×					
电路密度						×	×	×	
电路速度						×	×	×	

注 ×表示受影响程度深的性能。

表 2.17-40 印制电路板基材的选用指南（参考）

项目名称	刚性印制板					挠性印制板			
	酚醛纸质层压板	环氧纸质层压板	聚酯玻璃布层压板	环氧玻璃布层压板	聚酰亚胺玻璃布层压板	聚四氟乙烯玻璃布层压板	聚酯薄膜	聚酰亚胺薄膜	氟化乙丙烯薄膜 (FEP)
机械性能	○	○/+	+	++	+++	○/+			
电性能	○/+	+	+++	++	++	+++	+++	++	
耐高温性能	+	○/+	++	++	+++	+++	○/++	+++	
耐潮湿性能	○	○	+	+	+	++	+	+	++
耐焊接性能	+	+	++	++	++	+	—	○/+	○

注 1. “—”表示在某种条件下可能发生问题。
2. “○”表示中等，在大多数应用中，通常不会发生问题。
3. “+”、“++”、“+++”表示好、很好、最好。

1.5.3.3 PCB 外形及加工工艺的设计要求

为使设计出的 PCB 符合可制造性要求，应考虑如下几个方面：

(1) 元器件安装面的规定。为便于在生产过程区别 PCB 的两个元器件安装面，尤其是在采用双面回流焊工艺中，通常在 PCB 的工艺边或空白处标示区别标记，一般可标示 A 和 B 字符。对于采用一面回流焊，一面点胶的工艺的产品，

一般规定 A 面为元件面（回流焊面），B 面为焊接面（点胶面）。对于采用双面回流焊工艺的产品，一般先生产的一面为 A 面，另一面为 B 面。

(2) PCB 型号与版本。在 PCB 的工艺边或空白处应标示 PCB 的型号和版本。在每一块 PCB（小板）的空白处须标明 PCB 型号、版本、生产日期，以利于生产控制。

(3) PCB 工艺边。在 SMT 工艺和波峰焊工艺中，PCB

应留出一定的边缘便于设备夹持，此工艺边取 3~8mm（具体尺寸要根据不同的 SMT 设备而定），在此范围内不能放置元器件。在工艺边上须标注 PCB 流向记号，如“→”。

（4）定位孔设计。表面安装印制板的焊膏漏印、贴片等过程中需要定位，必须设置定位孔。设计原则为：沿 PCB 的长边相对应角的位置，应至少各有一个定位孔；定位孔的大小一般为直径 4.1mm，公差应在±0.075mm 之内；以定位孔作为施加焊膏和元器件贴装的原始基准时，孔的中心相对于底图的精度要求必须予以保证。其公差应达到如下要求：贴装 1.27mm 引脚中心距，引脚数不大于 44 个的有源器件时，公差为±0.025mm；贴装矩形片状元件时，公差为±0.075mm。

（5）PCB 外形设计。SMT 的 PCB 外形尺寸一般不能小于 50mm×50mm。如果所设计的 PCB 小于上述要求时，可采用拼板格式，拼板应符合如下要求：

1) 拼板尺寸应大于 50mm×50mm，但不可太大，应以制造、装配和测试过程中便于加工，不产生较大变形为宜。同时也不得超过设备的贴装范围要求。

2) 每块 PCB 上应设计有基准标记，常用的基准标记有：



基准标记尺寸一般在 1~2mm，通常取 1.5mm。注意标记应设计成不对称形式，以防止在生产中因 PCB 流向反而造成误贴。

3) 拼板在采用双面对刻的 V 形槽时，V 形槽深度应控制在板厚的 1/6~1/8。

4) 设计双面贴装不进行波峰焊的 PCB 时，可采用双数拼板正反面各半，两面图形按相同的排列方式可以提高设备利用率，节约生产准备费用和时间。

（6）PCB 的翘曲度。用于表面安装的 PCB，为避免对元件贴装造成影响，对翘曲度有较严格的工艺要求，如表 2.17-41 所示。

表 2.17-41 PCB 允许的翘曲度		
上翘曲	≤0.5mm	
下翘曲	≤1.2mm	

1.5.3.4 PCB 的焊盘设计要求

焊盘图形的设计在 PCB 设计中起着十分重要的作用，因为它不仅决定焊点的强度和可靠性，也影响着焊接缺陷的大小、可测试性、可清洗性、可修复性。也就是说，表面安装组装板的可制造性取决于焊盘图形的设计。

1.5.3.5 元器件布局的要求

元器件的布局应满足 SMT 生产工艺的要求，PCB 设计工程师要了解基本的 SMT 工艺特点，根据不同的工艺要求进行元器件布局设计，正确的设计可以使焊接缺陷降到最低。因此，在进行元器件布局时要考虑以下几点。

（1）类型相似的元件应该以相同的方向排列在板上，使得元件的贴装、检查和焊接更容易。还有，相似的元件类型应该尽可能接地在一起。例如，在内存板上，所有的内存芯片都贴放在一个清晰界定的矩阵内，所有元件的第一脚在同一个方向。这是在逻辑设计上实施的一个很好的设计方法，在逻辑设计中有许多在每个封装上有不同逻辑功能的相似元件类型。在另一方面，模拟设计经常要求大量的各种元件类型，使得将类似的元件集中在一起颇为困难。不管是否设计

为内存的、一般逻辑的或模拟的，都推荐所有元件方向为第一脚方向相同。

（2）PCB 上元器件的分布应尽可能地均匀；大质量器件回流焊时的热容量较大，因此，布局上过于集中容易造成局部温度过低而导致假焊。

（3）大型器件的四周要留一定的维修空间（留出 SMD 返修设备加热头能够进行操作的尺寸）。

（4）功率器件应均匀地放置在 PCB 的边缘或机箱内的通风位置上。

（5）单面混装时应把贴装和插装元件放在 A 面；采用双面回流焊混装时，应把大的贴装和插装元器件布放在 A 面，PCB A、B 两面的大器件要尽量错开放置；采用 A 面回流焊，B 面波峰焊混装时，应把大的贴装和插装元器件布放在 A 面（回流焊），适合于波峰焊的矩形、圆柱形片式元件、SOT 和较小的 SOP（引脚数小于 28，引脚间距大于 1mm）布放在 B 面（波峰焊接面）。波峰焊接面上不能安放四边有引脚的器件，如 QFP、PLCC 等。

（6）波峰焊接面上元器件封装必须能承受 260℃ 以上的温度并且是全密封型的。

（7）贵重的元器件不要布放在 PCB 的角、边缘或靠近接插件、安装孔、槽、拼板的切割、豁口和拐角等处，以上这些位置是 PCB 的高应力区，容易造成焊点和元器件的开裂或裂纹。

（8）波峰焊接元件的方向。所有的有极性的表面安装元件应尽可能以相同的方向放置。使用这个首选方向是要使装配在退出焊锡波峰时得到的焊点质量最佳。在排列元件方向时应尽可能做到如下三点（见图 2.17-46）。

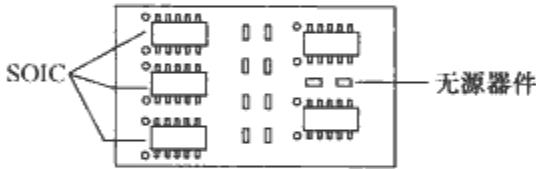


图 2.17-46 波峰焊接中元器件的应用方向

- 1) 有无源器件要相互平行。
- 2) 所有 SOIC 要垂直于无源器件的长轴。
- 3) 无源器件的长轴要垂直于板，沿着波峰焊机传送带的运动方向。
- 4) 当采用波峰焊焊接 SOIC 等多引脚元件时，应于锡流方向最后两个（每边各一）焊脚处设置窃锡焊盘，防止连焊。

1.5.3.6 可测试性设计要求

SMT 的可测试性设计主要是针对目前 ICT 装备状况。将后期产品制造的测试问题在电路和表面安装印制板设计时就考虑进去。提高可测试性设计要考虑工艺设计和电气设计两方面的要求。

（1）工艺设计的要求。PCB 定位的精度、基板制造程序、基板的大小、探针的类型都是影响探测可靠性的因素。

1) 精确的定位孔。在基板上设定精确的定位孔，定位孔的误差应在±0.05mm 以内，至少设置两个定位孔。采用非金属化的定位孔，以减少焊锡镀层的增厚而不能达到公差要求。

2) 测试点的直径不小于 0.4mm，相邻测试点的间距最好在 2.54mm 以上，应不小于 1.27mm。

3) 最好将测试点放置在元器件周围 1.0mm 以外，避免探针和元器件撞击损伤。定位孔环状周围 3.2mm 以内，不可有元器件或测试点。

- 4) 测试点不可设置在 PCB 边缘 5mm 的范围内。
- 5) 所有探测点最好镀锡或选用质地较软、易贯穿、不易氧化的金属传导物，以保证可靠接触，延长探针的使用寿命。
- 6) 测试点不可被阻焊膜或文字油墨覆盖，否则，将会缩小测试点的接触面积，降低测试的可靠性。

(2) 电气设计的要求。

- 1) 要求尽量将元件面的 SMC/SMD 的测试点通过过孔引到焊接面，过孔直径应大于 1.0mm，这样可使在线测试采用单面针床来进行测试，从而降低了在线测试的成本。
- 2) 每个电气接点都必须有一个测试点，每个 IC 必须有 POWER 和 GROUND 的测试点，并尽可能接近此元器件，其距离在 2.54mm 范围内。
- 3) 在电路的走线上设置测试点时，可将其宽度放大到 1.0mm。
- 4) 将测试点均衡地分布在 PCB 上。如果探针集中在某一区域时，较高的压力会使待测板或针床变形，进一步造成部分探针不能接触到测试点。
- 5) 电路板上的供电线路应分区域设置测试断点，以便于电源去耦电容或电路板上的其他元件对电源短路时，查出故障点更为快捷准确。设计断点时，应考虑恢复测试断点后的功率承载能力。

图 2.17-47 所示为测试点设计的一个示例。通过延伸线在元器件引线附近设置测试焊盘或利用过孔焊盘测试节点，测试点严禁选在元器件的焊盘上，这种测试点可能使虚焊节点在探针压力作用下挤压到理想位置，从而使虚焊故障被掩盖，发生所谓的“故障屏蔽效应”。由于探针因定位误差引起的偏晃，可能使探针直接作用于元器件的焊端或引脚上，而造成元器件损坏。

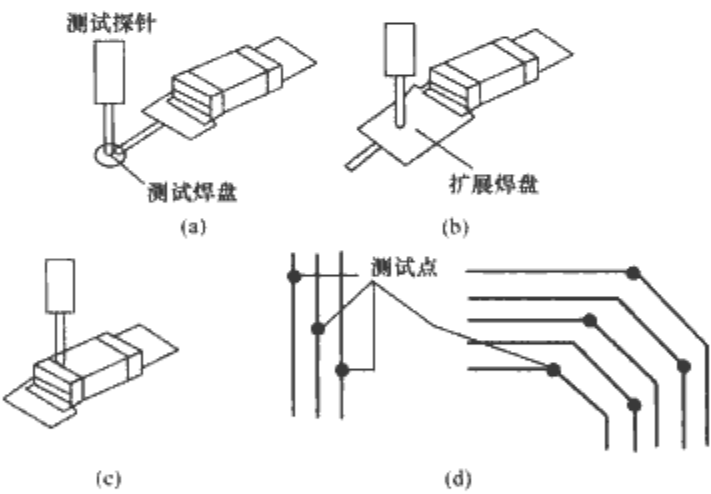


图 2.17-47 测试点设计示例
(a) 最佳设计；(b) 可接受设计；
(c) 禁用设计；(d) 可接受设计

1.6 特种加工工艺

1.6.1 概述

特种加工是 20 世纪 40 年代发展起来的，由于材料科学、高新技术的发展和激烈的市场竞争、发展尖端国防及科学研究的急需，不仅新产品更新换代日益加快，而且产品要求具有很高的强度质量比和性能价格比，并正朝着高速度、高精度、高可靠性、耐腐蚀、高温高压、大功率、尺寸大小两极分化的方向发展。为此，各种新材料、新结构、形状复杂的精密机械零件大量涌现，对机械制造业提出了一系列迫切需要解决的新问题。例如，各种难切削材料的加工；各种

结构形状复杂、尺寸或微小或特大、精密零件的加工；薄壁、弹性元件等特殊零件的加工等。对此，采用传统加工方法十分困难，甚至无法加工。于是，人们一方面通过研究高效加工的刀具和刀具材料、自动优化切削参数、提高刀具可靠性和在线刀具监控系统、开发新型切削液、研制新型自动机床等途径，进一步改善切削状态，提高切削加工水平，并解决了一些问题；另一方面，冲破传统加工方法的束缚，不断地探索、寻求新的加工方法，于是一种本质上区别于传统加工的特种加工便应运而生，并不断获得发展。后来，由于新颖制造技术的进一步发展，人们就从广义上来定义特种加工，即将电、磁、声、光、化学等能量或其组合施加在工件的被加工部位上，从而实现材料被去除、变形、改变性能或被镀覆等的非传统加工方法统称为特种加工。

1.6.1.1 特种加工的特点

- (1) 不用机械能，与加工对象的机械性能无关，有些加工方法，如激光加工、电火花加工、等离子弧加工、电化学加工等，是利用热能、化学能、电化学能等，这些加工方法与工件的硬度、强度等机械性能无关，故可加工各种硬、软、脆、热敏、耐腐蚀、高熔点、高强度、特殊性能的金属和非金属材料。
- (2) 非接触加工，不一定需要工具，有的虽使用工具，但与工件不接触，因此，工件不承受大的作用力，工具硬度可低于工件硬度，故使刚性极低元件及弹性元件得以加工。
- (3) 微细加工，工件表面质量高，有些特种加工，如超声、电化学、水喷射、磨料流等，加工余量都是微细进行，故不仅可加工尺寸微小的孔或狭缝，还能获得高精度、极低粗糙度的加工表面。
- (4) 不存在加工中的机械应变或大面积的热应变，可获得较低的表面粗糙度，其热应力、残余应力、冷作硬化等均比较小，尺寸稳定性好。
- (5) 两种或两种以上的不同类型的能量可相互组合形成新的复合加工，其综合加工效果明显，且便于推广使用。
- (6) 特种加工对简化加工工艺、变革新产品的设计及零件结构工艺性等产生积极的影响。

1.6.1.2 特种加工的分类

与其他先进制造技术一样，特种加工正在研究、开发推广和应用之中，具有很好的发展潜力和应用前景。依据加工能量的来源及作用形式列举各种常用的特种加工方法，见表 2.17-42。

表 2.17-42 常用的特种加工方法及作用形式

加工方法		主要能量形式	作用形式
电火花加工	电火花成型加工	电、热能	熔化、气化
	电火花线切割加工	电、热能	熔化、气化
电化学加工	电解加工	电化学能	离子转移
	电铸加工	电化学能	离子转移
	涂镀加工	电化学能	离子转移
高能束加工	激光束加工	光、热能	熔化、气化
	电子束加工	电、热能	熔化、气化
	离子束加工	电、机械能	切蚀
	等离子弧加工	电、热能	熔化、气化
物料切蚀加工	超声加工	声、机械能	切蚀
	磨料流加工	机械能	切蚀
	液体喷射加工	机械能	切蚀

续表			
加工方法		主要能量形式	作用形式
化学加工	化学铣切加工	化学能	腐蚀
	照相制版加工	化学、光能	腐蚀
	光刻加工	光、化学能	光化学、腐蚀
	光电成型电镀	光、化学能	光化学、腐蚀
	刻蚀加工	化学能	腐蚀
	粘 接	化学能	化学键
	爆炸加工	化学能、机械能	爆炸
成型加工	粉末冶金	热能、机械能	热压成型
	超塑成型	机械能	超塑性
	快速成型	热能、机械能	热熔化成型
复合加工	电化学电弧加工	电化学能	熔化、气化腐蚀
	电解电火花机械磨削	电、热能	离子转移、熔化、切削
	电化学腐蚀加工	电化学能、热能	熔化、气化腐蚀
	超声放电加工	声、热、电能	熔化、切蚀
	复合电解加工	电化学、机械能	切蚀
	复合切削加工	机械、声、磁能	切削

1.6.1.3 特种加工的发展趋势

(1) 按照系统的观点，加大对特种加工的基本原理、加工机理、工艺规律、加工稳定性等深入研究的力度。同时，充分融合以现代电子技术、计算机技术、信息技术和精密制造技术为基础的高新技术，使加工设备向自动化、柔性化方向发展。

(2) 从实际出发，大力开发特种加工领域中的新方法，包括微细加工和复合加工，尤其是质量高、效率高、经济型的复合加工，并与适宜的制造模式相匹配，以充分发挥其特点。

(3) 污染问题是影响和限制有些特种加工应用、发展的严重障碍，必须化大力气利用废气、废液、废渣，向“绿色”加工的方向发展。

可以预见，随着科学技术和现代工业的发展，特种加工必将不断完善和迅速发展，反过来又必将推动科学技术和现代工业的发展，并发挥愈来愈重要的作用。

1.6.2 电火花加工

1.6.2.1 电火花加工的基本原理

电火花加工是基于电火花腐蚀原理，在工具电极与工件互相靠近时，极间电压将在两极间“相对最靠近点”使电介液电离击穿，而形成火花放电，并在火花通道中瞬间产生大量热能，足以使金属局部熔化甚至气化，蒸发而将金属蚀除下来。

1.6.2.2 电火花加工工艺系统与特点

- (1) 电火花加工工艺系统：
 - 1) 脉冲电源及其参数调节与控制装置。
 - 2) 电火花加工过程的数字伺服控制和精密、灵敏的传动机械。
 - 3) 电火花加工介质（工作液）供给、过滤和储存装置。
 - 4) 装夹工具电极与工件的夹具。
- (2) 电火花加工工艺特点与应用：
 - 1) 电火花加工为不接触加工，是依赖脉冲放电的高温热能加工，无切削力作用，可以加工薄形工件或具有窄槽、窄缝、微细型孔和型腔。
 - 2) 电火花放电的电流密度很高，产生的高温足以熔化

和气化任何导电材料，可加工任何硬、脆、软、黏或高熔点金属材料，包括经过热处理的钢和合金。

3) 电火花加工是通过一系列脉冲放电来蚀除工件材料，而其脉冲参数可以任意调节，因此在同一台机床上可以连续进行粗、中、精加工。也便于实现自动控制和加工自动化。

4) 电火花加工与机械加工相比，加工效率较低，故常用于精、尖加工；还需制造成型电极，而且在加工中电极有损耗，准备时间较长，精度亦受限制。

5) 电火花加工工件必须是导电材料，加工必须在加工液中进行。

1.6.2.3 电火花成型加工方式

(1) 仿形法。也称“反拷贝”加工，即按照工件形状、尺寸及其精度要求，设计、制造凸凹形状相反、尺寸与精度相同、留有加工平动量，用来进行成型加工，称电火花仿形加工。其加工方式有单电极、多电极、单电极平动和分解电极四种常用的方式。

(2) 创成法。又称展成法、轨迹法。即按工件加工面形状要求，编制二维数字轨迹加工代码，采用形状简单的圆柱体电极（一般用铜电极），作自转，并使沿数控轨迹（使电极外圆沿工件型面）运动，作电火花成型加工。

1.6.2.4 电火花加工的基本工艺规律

电火花加工时，电极与工件间通过放电而使二者都被蚀除，蚀除产物有固相和气相的，并伴以声波和射频波辐射。工具电极的蚀除形成电极损耗，而工件的蚀除使之达到被加工的目的。放电后，电极表面往往覆有涂层，工件的被加工面则产生与原工件材料性能不同的变质层。

电火花放电时的放电电压通常在 25~45V 之间，其大小与电极和工件材料的性质、工作液、脉冲电流等因素有关。

正常的电火花放电加工过程一般认为是击穿——介质游离——放电——放电结束——绝缘恢复的过程，然后再一次放电。

1.6.2.5 电规准对加工的影响

- (1) 电规准中三个重要参数：
 - 1) 脉冲宽度 T_{on} ——又称放电持续时间。
 - 2) 脉冲间隔度 T_{off} ——又称放电停歇时间。
 - 3) 脉冲峰值电流 I_p ——正常放电时的脉冲电流幅值。
- (2) 电规准对加工的影响。加工的工艺效果主要决定于这三个元素。调节三元素可以针对不同的加工对象，加工出符合要求的工件。它们对加工生产率、粗糙度、间隙、电极损耗、表面变质层、斜度、加工稳定性等各个方面都有重要影响。

电火花成型加工技术在制造业领域占有重要地位，是实现难加工材料、复杂零件精密加工的有效手段。研究人员应借鉴其他加工技术发展的成功经验，扬长避短，充分利用现代科技发展的相关成果，在深入研究电火花放电机理的基础上，指导电火花成型加工工艺理论和控制理论的研究，改善机床结构和设计方法，建立基于 PC 机的开放性数控体系，实现智能控制技术与电火花成型加工技术的有机结合，同时高度重视操作安全和环境保护，全面推动电火花成型加工技术更快发展。

1.6.3 电火花线切割加工

1.6.3.1 线切割工作原理、应用、分类

电火花线切割加工，简称线切割，其基本工作原理是利用连续移动的细金属丝（称为电极丝）作电极，对工件进行脉冲火花放电蚀除金属、切割成型。它主要用于加工各种形

状复杂和精密细小的工件,如冲裁模的凸模、凹模、凸凹模、固定板、卸料板等,成型刀具、样板、电火花成型加工用的金属电极,各种微细孔槽、窄缝、任意曲线等,具有加工余量小、加工精度高、生产周期短、制造成本低等突出优点,已在生产中获得广泛的应用,目前国内外的电火花线切割机床已占电加工机床总数的60%以上。

根据电极丝的运行速度不同,电火花线切割机床通常分为两类:一类是高速走丝电火花线切割机床(WEDM-HS),其电极丝作高速往复运动,一般走丝速度为8~10m/s,电极丝可重复使用,加工速度较高,但快速走丝容易造成电极丝抖动和反向时停顿,使加工质量下降,是我国生产和使用的主要机种,也是我国独创的电火花线切割加工模式;另一类是低速走丝电火花线切割机床(WEDM-LS),其电极丝作低速单向运动,一般走丝速度低于0.2m/s,电极丝放电后不再使用,工作平稳、均匀、抖动小、加工质量较好,但加工速度较低,是国外生产和使用的主要机种。

1.6.3.2 线切割工艺特点

(1) 线切割的成型加工过程中的切割运动轨迹采用数字控制;可直接成型切割完成模具成型件,不需制造电极。更换加工对象另一成型件时,只需另编程序即可进行线切割加工。其能够加工的工件形状包括:各种复杂的二维型面、小孔、可切割0.05~0.07mm的窄缝以及圆角半径小于0.03mm的锐角等。线切割的余量小,余料可利用。对贵重金属的加工经济性尤高;同时,由于为无切削力加工,可用以切割薄片件、易变形的工件等。

(2) 由于电极丝在切割过程中,不与工件接触,进行连续运动,因此,其单位长度上的损耗小,所以在切割面积不大的工件时,因电极损耗引起的加工误差则很小,甚至可忽略。

(3) 脉冲电源输出用以电火花加工的电流小、脉冲宽度较窄,属于半精、精加工范畴。故常采用负极性加工,即:脉冲电源的正极——工件;电极丝——负极。反之称正极性加工。

电火花线切割的自动化程度高,可进行多台管理,成型加工周期短、成本低等。

1.6.3.3 线切割工艺

(1) 工艺条件。线切割加工工艺条件包括:

- 1) 工艺参数:脉宽、脉间、管数、伺服、电压和波形。
- 2) 工作液:乳化油浓度或水电阻值,供给量。
- 3) 电极丝:品种、丝径与张力。

(2) 工艺参数的选择。

1) 波形(GP)选择,分为:①矩形波脉冲(O),加工效率高、范围宽、稳定性能好,快走丝常用此波形进行加工;②分组脉冲(I),适用于薄形工件加工,精加工稳定性好。

2) 脉宽(ON)选择,脉冲放电时间的值,在一定工艺条件下,ON增加,加工速度提高,表面粗糙度增大。

3) 脉间(OFF)选择,在特定的工艺条件下,OFF降低,切割速度提高,对表面粗糙度影响不大,但OFF不能太小,否则将电离不充分,电蚀物来不及排除,造成加工不稳定。

4) 功率管数(IP)选择,管数的增或减取决于脉冲峰值电流的大小。

5) 间隙电压(SU)选择,用来控制伺服运动的参数。

6) 加工电压(U)选择,U有两种选择,即“0”常压选择;“1”低压选择,一般用于加工找正。加工时都选用常

压“0”。

(3) 工作液的选用。快走丝常选用乳化液作为加工介质;慢走丝常选用水作为加工介质。

(4) 电极丝。作为电火花线切割工艺系统中的工具电极,快走丝常采用钼丝作为加工电极,可循环使用,慢走丝常采用铜丝作为加工电极,不可循环使用。

(5) 线切割工艺质量、精度及其影响因素。

1) 线切割表面粗糙度与切割速度。影响加工面粗糙度的因素主要有:电极丝切割运动不稳定,丝张力不足,电极丝损耗,导丝机构的磨损等。

切割速度主要与工件材料及厚度有关。

切割速度=(切割长度×工件厚度)/加工时间(mm²/min)

2) 线切割的加工精度。切割精密模具成型件时,需采用精密线切割机床多次切割法,成型切割精度可达到0.002mm。

影响线切割精度的因素主要为:工件材料内应力引起的变形误差,找正、定位基准误差,电极丝变形损耗与运动系统精度所引起的加工误差,电火花切割的脉冲参数等。

1.6.3.4 线切割机床

线切割加工机主要生产厂商中低速慢丝高档机以瑞士及日本制造为主,中挡机以台湾为主。

1.6.3.5 线切割数控程序编制

精确的线切割程序是线切割工艺系统构成的核心部分,是进行精密成型线切割工艺的关键技术。精确编制线切割程序是掌握线切割工艺的基本功,掌握其指令系统中各种指令的编程方法和技巧及线切割工艺的基本要求。

线切割程序的常用格式有3B、4B、G代码等,现在编程一般都借用编程软件,利用CAD二维或三维图形,通过人机交互式编程,可直接加工带锥度的复杂型腔。

1.6.3.6 电火花线切割技术的研究现状和发展趋势

电火花线切割技术经过近半个世纪的发展,现已十分成熟,并达到了相当高的工艺水平。最大的切割速度可达500mm²/min,最佳表面粗糙度R_a在0.1~0.2μm,加工尺寸精度在±0.002mm以内,高速走丝电火花线切割机还能稳定切割1m的超厚工件。为了提高电火花线切割工艺水平,提高机床自动化程度和智能化程度,满足市场的不同要求,国内外电加工研究人员及制造商都在积极采用现代研究手段和先进技术进行深入开发研究,向电火花线切割加工信息化、智能化和绿色化方向发展。

1.6.4 激光加工技术

1.6.4.1 概述

激光加工技术是利用激光束与物质相互作用的特性对材料(包括金属与非金属)进行切割、焊接、表面处理、打孔及微加工等的一门加工技术,是集光学、材料科学、热力学、化学、电子学和机电控制科学等为一体的系统科学与集成技术,也是一门应用广泛的综合技术。

激光加工技术分为激光加工系统和激光加工工艺。重点是:

- (1) 激光切割技术。
- (2) 激光焊接技术。
- (3) 激光表面处理技术。
- (4) 激光加工光束质量及加工外围装置技术。
- (5) 激光加工设备参数的检测技术。
- (6) 激光加工用大功率CO₂和固体激光器技术等。

1.6.4.2 激光加工技术的应用

(1) 激光钻孔机。在激光钻孔机问世之前,对各种机械零件钻孔靠的是电动钻孔机或机床。激光钻孔的原理,是利用激光束聚焦使金属表面焦点温度迅速上升,温升可达每秒100万℃。当热量尚未发散之前,光束就烧熔金属,直至汽化,留下一个个小孔。激光钻孔不受加工材料的硬度和脆性的限制,而且钻孔速度异常快,快到可以在几千分之一秒,乃至几百万分之一秒内钻出小孔。

与激光钻孔机堪称兄弟的是激光切割机和激光焊接机。

(2) 激光切割机。知道了激光钻孔的原理,就容易理解激光为什么可以切割金属材料了。只要移动工件或者移动激光束,使钻出的孔洞连边成线,就自然能将材料切割下来了。而且,不论是什么样的材料,如钢板、钛板、陶瓷、石英、橡胶、塑料、皮革、化纤、木材等,激光都像一柄削铁如泥的光剑,而且,切割的边缘非常光洁。

(3) 激光焊接机。激光之所以能用来焊接,是因为它的功率密度很高。所谓功率密度高,是指在每平方厘米面积上能集中极高的能量。激光的功率密度有多高呢?我们可以作个比较:工厂里通常用于焊接的乙炔火焰能将两块钢板焊在一起,这种火焰的功率密度可以达到1000W/cm²;氩弧焊设备的功率密度还要高,可以达到10000W/cm²。但这两种焊接火焰根本无法与激光相比,因为激光的功率密度不仅可以焊接一般的金属材料,还可以焊接又硬又脆的陶瓷。不小心打破碗碟,也用不着惋惜,只要用激光焊接机就可以重新将破片焊好,甚至连疤痕也难以发现。

(4) 激光淬火。激光淬火,是用激光扫描刀具或零件中需要淬火的部位,使被扫描区域的温度升高,而未被扫描到的部位仍维持常温。由于金属散热快,激光束刚扫过,这部分的温度就急骤下降。降温越快,硬度也就越高。如果再对扫描过的部位喷射速冷剂,就能获得远比普通淬火要理想得多的硬度。

2 低压电器在线测试技术与装备

2.1 概述

随着我国经济的飞速发展,电力需求量越来越大,低压电器的年产量也大幅度增长。低压电器产品应用广泛、量大面广,几乎渗透到所有用电领域,它的质量优劣直接影响到各种电气设备的安全运行。如何保证其质量可靠性,如何运用现代化测试手段来提高塑壳断路器的制造水平和工艺水平,在生产过程中对产品进行在线自动检测,对重要参数进行调试、校正,一直是国内低压电器制造业技术的难题。

国内著名低压电器制造企业在不断地开发拥有自己知识产权的产品和品牌,同时加大在线测试技术与制造装备投入。向国外著名的制造商看齐,做精、做强、做专。先后与有实力的自动化专业技术公司联合开发了交流接触器装配检测生产线、塑壳断路器装配检测校核生产线、万能式断路器装配检测校核生产线、小型断路器装配检测生产线、电动机起动机装配检测生产线、热继电器调整检测生产线等一系列自动化生产线及专用设备。采用高科技手段使电器生产、装配与在线检测技术过程现代化,应用计算机技术、激光测量技术、传感器技术、数控技术和自动检测技术研制成功光、机、电一体化自动检测生产流水线。

2.2 交流接触器自动检测生产流水线

2.2.1 吸合特性、释放特性试验

产品经输送机构到达检测工位,其安装位置可靠定位。

气动装置将所有电极杆与对应的端子连接,包括主回路进出线端子、控制回路进出线端子、线圈接线端子。确认产品线圈规格与检测单元的设置值相同,避免低控制电压线圈通入高控制电压后发生烧毁现象,采用防错法防止同一规格产品混入其他规格产品设置;通一试验电压,一般选择不同额定控制电源电压的最低值(如24V),检测线圈电流,与对应规格产品设置标准值进行比较,符合设置值范围的进行下一步检测。否则认为产品规格与对应线圈不符。

(1) 吸合特性试验。根据产品设计以及线圈在冷态和热态的差异,对被测产品通65%~75% U_N 之间的一个确定值,检查触点状态转换结果,然后与设置值范围进行比较,判断产品是否合格。每台产品一般进行6次吸合特性试验,保证有1~2次在恶劣相位角下进行吸合特性试验。

(2) 释放特性试验。被测产品吸合后,在控制电源不断电的状态下,转换到75%~57% U_N 之间一个确定电压,判断其是否释放?释放为不合格;又从75%~57% U_N 之间一个确定电压在不断电的情况下,转换到25%~35% U_N 之间一个确定的释放电压值,判断其产品是否完全释放?不释放为不合格。当保持状态的控制电源电压值为吸合特性检测时的电压值时,本检测可在吸合特性检测的释放过程中进行。

2.2.2 吸合、释放动作时间、吸引电流、保持功耗测试

被测产品在吸合、释放过程中,根据产品状态检测出吸合和释放动作时间、线圈吸引电流、保持功耗,与设置标准值进行比较,判断产品是否合格。因电流与电压有严格的比例关系,所以检测线圈电流时的控制电源电压值可以在产品的最低吸合电压与最高使用电压之间任取,一般为100% U_N 或吸合特性检测时的电压值。

2.2.3 触头开距、超程测量

由直动式接触器产品结构特点决定,直接检测触点状态转换时动触头支架的位移量。

可在接触器的吸合过程中,检测触点状态转换时相对位移量;也可在接触器的释放过程中,检测触点状态转换时相对位移量。由于接触器的自身吸合速度较快,其触点在接通过程中有弹跳现象,捕捉触点状态变化有一定难度,所以在吸合过程中检测(模拟)时,主回路开距段位移一般采用外力驱动方式,主回路超程段的位移利用接触器自身吸合。以下主要介绍两种不同测量方法。

方法一:在吸合过程中检测,采用步进电动机驱动方式,步进电动机带动丝杆转动,丝杆推动螺母移动,其螺母上测杆前端装有测头定位传感器,此传感器利用磁场间隙大小决定磁力强度,即迫使测头导通之力一定小于产品动触头支架最大静摩擦力。测头定位传感器在测杆推动下与被测产品动触头支架平面直接作用,使测头定位传感器导通(产品动触头支架纹丝不动),测头定位传感器第一次给控制系统一个信号(脉冲计数开始),步进电动机继续转动直至被测产品常开回路全部接通、常闭回路全部断开后停止,这时被测产品线圈通电吸合并延时后,其间动触头支架与测头产生间隙,测头定位传感器断开,步进电动机再转动至测头定位传感器导通第二次给控制系统一个信号后,测杆回退至起始位置待命。在这过程中每一主回路接通和每一控制回路的接通或断开状态信号均送至控制系统。控制系统根据测头定位传感器第一次给控制系统的信号到每一回路的接通或断开状态变化瞬间信号获得与之对应控制系统控制步进电动机转动的触发信号的脉冲数,计算出被测产品每一常开回路的开距和每一常闭控制回路的超程。控制系统根据测头定位传感器第二次给控制系统的信号产生触发脉冲总数,计算出被测产

品每一常开回路的超程、每一常闭控制回路的开距及同步差值。与设置标准值范围进行比较,判断产品是否合格。

方法二:在释放过程中检测,采用激光非接触测量方式。被测产品到位后,激光位移传感器在动触头支架的原始位置(触针的圆形平面)进行第一次数据采集,然后被测产品线圈通电吸合并延时,进行第二次数据采集,则第一次数据采集值与第二次数据采集值之差为总行程。之后被测产品线圈断电释放过程中,控制系统捕捉到每一常开回路断开和每一常闭控制回路闭合的状态变化瞬间信号,激光位移传感器及时、准确地进行多次数据采集,而得到每一常开回路的超程、每一常闭控制回路的开距同步差值。控制系统根据测量结果与设置标准值范围进行比较,判断产品是否合格。

上述两种测量方法具有测量系统精度高、速度快和重复性测量误差小,可实现 0.01mm 的控制精度,重复测量精度可在 ±0.02mm 范围内。

2.2.4 工频耐压测试

被测产品分别在吸合状态和释放状态进行耐压测试,吸合状态检测各回路之间、回路与线圈之间、回路与地之间、线圈与地之间,释放状态检测各回路进出端之间、回路与线圈之间。试验电压大于或等于 2 倍被测产品的额定工作电压 ($2U_N$),一般选 50Hz、2500V 或 3500V,施加时间 1s,各项无击穿、无闪络现象,泄漏电流小于 25mA 或 30mA 为合格。

2.2.5 噪声检测

被测产品置于相对密封、隔声的容器中,在被测产品吸合后的保持状态,用声级计检测被测产品磁系统的噪声,共测三次,每次 2s,与设置标准值范围进行比较,判断产品是否合格,控制电源电压值一般为 100% U_N 。

2.3 塑壳断路器自动检测生产流水线

2.3.1 触头开距、超程的非接触测量

塑壳断路器结构复杂,制造装备工艺要求高,一般采用生产流水线装配方式。在线测试系统就是在实际生产条件下,对生产装配过程中的塑壳断路器进行触头的开距、超程、同步差等各项参数的自动测量。由于塑壳断路器结构紧凑,一般测量探头无法伸入,有些参数必须在特定动作状态中才能测出,在线测试系统还要求测量精度高、重复性误差小、测量速度快,能适应生产流水线节拍等一系列的复杂要求。

(1) 开距是断路器处于分闸状态时,动触头触点与静触头触点之间最小距离。

(2) 超程是断路器处于合闸时,动静触头完全达到闭合状态时到除去静触头后,动触头的继续运动行程。

(3) 测试方法与计算。开距、超程测试采用激光位移传感器,其测量示意图见图 2.17-48。由两台步进电动机控制在平行于塑壳断路器平面内作二维扫描,对触头进行非接触测量,通过测试获得激光光斑在动触头顶部的某点在分合闸运动中的四个坐标位置值。以开距测量为例计算。

a. 首先测量得动触头顶部的某一点在分闸状态的坐标位置记为 (O_x 、 O_y)。

b. 合闸后,通过扫描测量得同一点在合闸状态的坐标位置,记为 (M_x 、 M_y)。

c. 气动机械手向上拉动触头,在动触头同静触头分断瞬时,捕捉到同一点的坐标位置 (U_x 、 U_y)。

测试结果计算

$$kj = rk(\sin\alpha_1 - \sin\alpha_2) \quad (2.17-2)$$

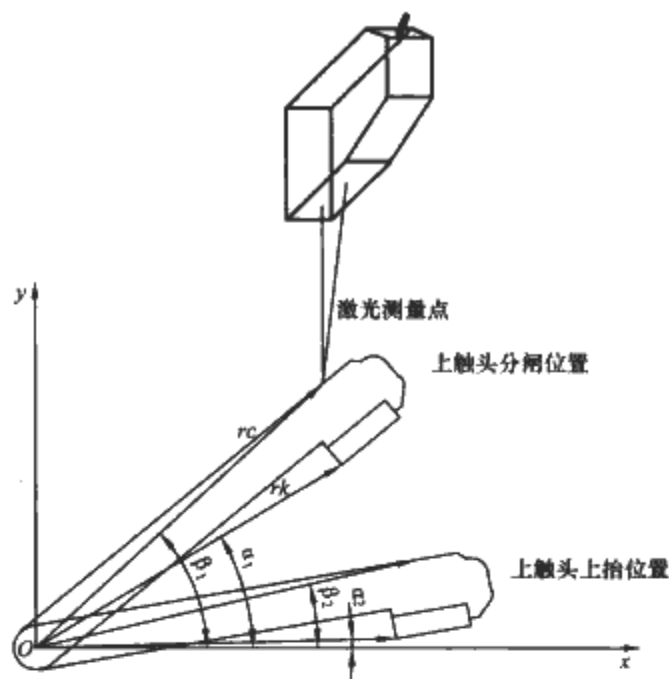


图 2.17-48 开距激光测量示意图

式中: rk 为上触头最低点转动的半径; α_1 为 rk 起始位置与 x 轴夹角; α_2 为 rk 的上拉位置与 x 轴夹角。

其中 $\alpha_1 = \beta_1 - \theta$, $\alpha_2 = \beta_2 - \theta$ 代入式 (2.17-2)

整理得

$$kj = rk[(\sin\beta_1 - \sin\beta_2)\cos\theta - (\cos\beta_1 - \cos\beta_2)\sin\theta] \quad (2.17-3)$$

而 $\sin\beta_1 - \sin\beta_2 = (O_y - U_y)/rc$; $\cos\beta_1 - \cos\beta_2 = (O_x - U_x)/rc$ 代入式 (2.17-3) 得

$$kj = rk\{[(O_y - U_y)/rc]\cos\theta - [(O_x - U_x)/rc]\sin\theta\} \quad (2.17-4)$$

式中: θ 为 rc 与 rk 的夹角; rc 为测试点转动半径; β_1 为 rc 起始位置与 x 轴夹角; β_2 为 rc 的上拉位置与 x 轴夹角; O_x 、 O_y 为测试点起始位置值; U_x 、 U_y 为测试点上拉位置值。

同步差计算: 开距最大值减去开距最小值,求得同步差

$$\Delta bc = kj_{\max} - kj_{\min} \quad (2.17-5)$$

(4) 系统硬件、软件结构与设计。其中机械手的作用主要完成触头的上拉动作,分合闸机构完成开关的分闸、合闸动作。激光扫描机构为测量装置,由两台步进电动机带动激光位移传感器,在平行于夹紧机构底面的平面内作二维扫描,其中机械手、夹紧机构和分合闸机构采用气缸作为执行器,而激光扫描机构采用步进电动机作为执行器。气缸和步进电动机分别在气控单元和电动机驱动器控制下工作。上述各机构的位置和动作则通过光电传感器、磁性开关、接近开关和霍尔开关等输入信号反馈到 PLC 或工控机。

激光位移传感器可根据塑壳断路器规格选定,一般激光位移传感器其主要性能如下:

测试精度 0.04mm (在 10Hz 响应频率下)。

输出为 ±5V/FS。

响应速度为 1kHz/100Hz/10Hz。

整个系统软件采用模块化结构。采用特征点扫描。由测试程序采集测量值,传递给识别模块,由识别模块实时确定扫描特征点,返回值给测试模块,测试模块根据返回值来确定下一步动作。

2.3.2 触头终压力、脱扣力的测试

(1) 终压力。塑壳断路器合闸后,测量动触头终压力,即动触头受到垂直向上外力时与静触头脱离接触时的力。

(2) 脱扣力。被检测的断路器必须处于合闸状态,然后用带测力传感器的测力装置对准中相牵引杆,以双金属片上

调节紧定螺钉顶牵引杆的部位旁边为测力点，进行缓慢推进测力（不能用冲击速度，应尽量模拟双金属片受热弯曲的速度）。

(3) 测试方法与流程。塑壳断路器处合闸状态进入生产线单元，上下料旋转机械手将待检产品从传输带上抓取放进检测平台（多工位），夹紧气缸将产品夹紧，触点气缸伸出分别将断路器触头回路接通。限位气缸缩回，由平衡装置、手指气缸的测力机械手自然垂直，将力的信号正确地传递给测力传感器。限位气缸伸出，垂直运动电动机将测力机械手指伸进触头隔弧室，限位气缸缩回，手指气缸抓住上触头，由平衡装置克服侧向力，有效地将力传到测力传感器上。然后垂直运动电动机将测力机械手指向上提拉，此间动触头与静触头断开时，系统采样测力传感器信号。循环完成每相终压力测试。

脱扣力测试由步进电动机带动另一个测力传感器作水平运动，快速前进到脱扣力测试点，然后经过脉冲细分电动机缓慢将测力传感器上关节顶针伸向牵引杆上脱扣力的测试点，直到脱扣器完全脱扣，整个过程中最大采样值为脱扣力。

2.3.3 回路电阻的测定

回路电阻是指产品在额定电流下触头接触电阻与断路器内部导体电阻之和。回路电阻在电路形成了有功损耗，使断路器发热并在工作过程中持续地消耗电能。回路电阻的测定是判定产品主要性能标志之一。

测量系统由电流、电压测试回路和控制单元组成，直流稳压稳流电源提供测量电流，由不同规格产品选择额定电流输出。测量电极架将被测产品每相串接，电流回路上有四个电流变送器，分为四挡确保输入 A/D 采样值精度。测量电极上触针将电极内侧的电压降分四极（A、B、C、N），由四只电压变送器与电流变送器同步采样送入 A/D 通道。

2.3.4 延时特性校验

延时特性校验采用热态调节方式。

延时特性热态调节方法与流程：读取产品条形码，多工位自动上料、定位夹紧，自动加载等效校核电流，双金属片热变形，当达到规定时间未脱扣时，步进电动机转动的调节螺丝刀接近导入双金属片上调节螺钉，使其脱扣。然后放入料道，进入下一相热态调节。最后拧紧螺母。

2.3.5 瞬时特性校验

瞬时特性校验方法与流程：经隔放料工位，读条码，系统对产品规格作出判断，机械手将待检产品从传输带上抓取放进检测工位（多工位），电极夹紧定位、储能、合闸。系统根据产品规格指定相应的电压、电流预稳给定值（90% I_N ）输出到恒流源控制站，接通预稳电流回路，电流互感器和电流变送器将输出电流信号反馈到伺服调压器控制部形成电流调节闭环，恒流源开始自动电流反馈调节，电流回路电流稳定调节完成后，恒流源给系统发出调节到位信号，断开预稳电流回路。确认预稳回路完全断开后，先切换自耦变压器指定输出电流倍数挡，待合闸相位角电路检测到电压波形过零点时，固态继电器 SSR 导通，升流变压器工作，形成不动作电流，电流主回路开环，判断设定时间范围内断路器应不脱扣。其动作电流校验与上述过程相同。

数字式瞬时恒流源的实现原理，见图 2.17-49。

2.3.6 耐压检测

此工序采用 3000V 电压（工频）对产品耐压检测，多工位自动上料、夹紧。检测内容包括：断路器分闸状态下，连接在一起的电源端和连接在一起的负载端之间；断路器合

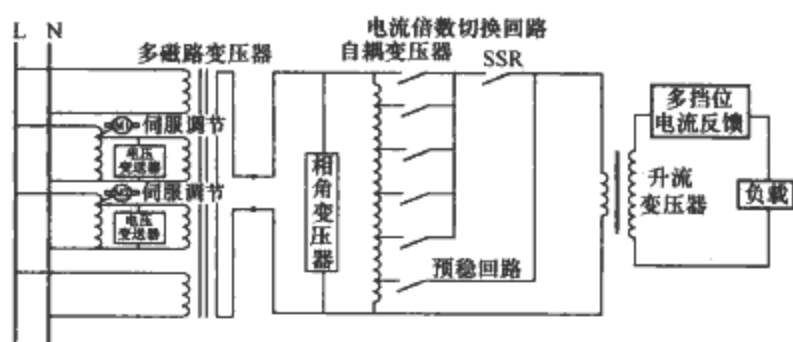


图 2.17-49 数字式瞬时恒流源原理图

闸状态下，极与极之间、极与外壳之间（对地）、极与手柄之间。检测时间 1s，检测时无闪络，泄漏电流小于 100mA 为合格。

2.3.7 延时特性检验

因生产线节拍要求，延时特性检验单元工位多。延时特性检验方法与流程：断路器处合闸状态，经隔放料工位，读条码，系统对产品规格作出判断，机械手将待检产品从传输带上抓取放进检测工位（多工位），电极夹紧定位。系统根据产品规格指定相应的电压、电流给定值输出到恒流源控制站，待合闸相位角电路检测到电压波形过零点时，固态继电器 SSR 导通并形成电流回路，恒流源开始自动电流反馈调节。电流输出回路处设有多只、多挡位电流互感器和电流变送器，将输出电流信号反馈到伺服调压器控制部形成电流调节闭环。对输出电流进行实时、动态、精确地调节。确保断路器在指定电流给定值、有效时间范围内进行可靠的延时特性检验。

数字式延时恒流源的实现原理，见图 2.17-50。

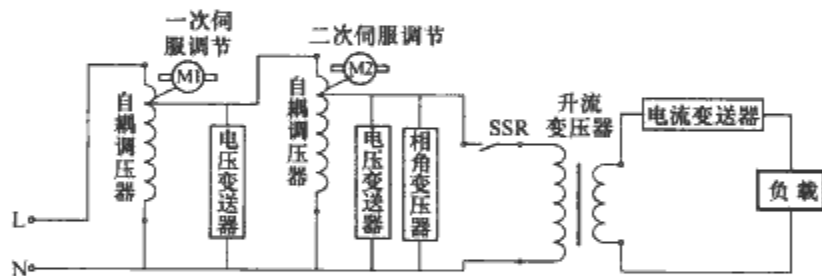


图 2.17-50 数字式延时恒流源原理图

恒流源是低压电器行业自动化测试生产线的核心设备，控制系统由模拟控制发展为数字控制，随着电力电子技术及控制理论发展，新一代的电子式恒流源已开始广泛开展使用，取代调压器调节较薄弱环节。具有控制精度高、使用方便、信号处理及通信能力更强、维护量小等特点。电流输出范围覆盖从毫安级到 10kA 级所有电流等级。

2.4 万能式断路器自动检测生产流水线

万能式断路器在线检测部分主要完成对于手工装配好的产品进行机械操作试验及动作特性试验、欠电压脱扣器动作特性试验、接地故障保护检测、长延时校核、瞬时校核、耐压检测。生产线在以上检测单元前设自动条码阅读器，在工件的侧面读取含有产品型号、生产日期和企业内部密码信息的条码，并根据条码的信息自动确定产品的型号，检测信息存入计算机。

2.4.1 机械操作试验及动作特性试验

机械操作试验及动作特性试验单元由隔料挡料装置、条形码阅读器、隔声仓、加电装置等组成。

(1) 控制电压。常用控制电压：230VAC、400VAC、220VDC。

(2) 测试过程。在上料方向端，采用条形码阅读器自动识别产品类型，隔料装置自动放出多件框架断路器本体随托

盘进入机械操作试验及动作特性试验单元,手工把接线排插入本体的二次回路接线端子后,关上隔声门,操作触摸屏,系统自动对断路器进行多次机械操作试验。在机械操作试验结束后,进行动作特性试验5个循环,测试时,实际控制电压值显示在人机操作界面上。

(3) 功能。

1) 能够自动地按一定的操作程序对分励脱扣器、合闸电磁铁、电动操作机构进行电动操作特性测试,并能自动判定特性是否合格,不合格品手工取出。

2) 同时完成对辅助触头的检测,自动判定每路辅助触头回路工作是否正常。

3) 对被测试的断路器进行单独计数,互不影响。检测断路器机械性能,自动记录故障并提示,并可根据人工判断继续试验。

2.4.2 欠电压脱扣器动作特性试验

欠电压脱扣器动作特性试验单元由条形码阅读器、隔料挡料装置、定位举升装置、二次接线端子加电装置等组成。

(1) 试验电压。

1) 常用试验电压: $100\%U_N$, $85\%U_N$, $70\% \sim 35\%U_N$ 。

2) $\leq 35\%U_N$ 断路器不能合闸。

3) 试验电压输出为连续可调类型电源。

(2) 试验过程。装配完抽屉座的断路器运行到本工序,设备采用自动隔料、挡料,工件到位后,夹紧定位装置自动对断路器定位,二次回路接线装置自动与二次回路接线端子连接,然后对欠电压脱扣器进行四次断电脱扣试验,断电时间(s)分别为0.1, 0.2, 0.3, 0.4,并记录释放时的试验电压。

2.4.3 接地故障保护检测

接地故障保护检测单元由条形码阅读器、隔料挡料装置、定位举升装置、二次接线端子加电装置、主电极加电机构及下废料机构等构成。

测试过程。本单元采用自动隔料、挡料,工件到位后,夹紧定位装置自动对断路器定位,二次回路接线装置自动与二次回路接线端子连接,加电装置自动与断路器主接线端子连接;自动操作使断路器闭合,闭合后自动加载,依次对N(三极断路器无N极)、A、B、C通检测电,通过辅助回路反馈给PLC的信号,自动检测断路器接地保护是否合格。每相测试前都应使断路器闭合。

控制回路的通断通过电动操作来判断,若各部件工作正常,可断定回路正常。

以上检测结束后,若检测合格,工件自动向后传输,若检测不合格,工作站后边的下废料机构自动把工件升起,手工把工件推到不合格下料运输小车上,然后把工件运到相应工位进行检修。

2.4.4 长延时校核、瞬时校验

长延时校核、瞬时校验单元由条形码阅读器、隔料挡料装置、定位举升装置、二次接线端子加电装置、主电极加电机构及下废料机构等构成。

(1) 校核过程。本单元采用自动隔料、挡料,工件到位

后,夹紧定位装置自动对断路器定位,二次回路接线装置自动与二次回路接线端子连接,加电装置自动与断路器主接线端子连接;自动加控制电压使断路器闭合;自动对断路器加载 $1.5I_N$ 等效电流,自动对断路器进行长延时间检测(15s),自动判定延时特性是否合格。

长延时校核完成后,手工调节断路器操作面板,把瞬时准定值调到最小,将断路器手动闭合,然后手动按动操作按钮,设备对断路器自动加载大电流,进行瞬时操作,检测断路器在30ms内是否脱扣。本单元配备恒流源,能根据不同的断路器自动调整测试电流值。以上检测结束后,若检测合格,工件自动向后传输,若检测不合格,工作站后边的下废料机构自动把工件升起,手工把工件推到相应工位进行检修。

(2) 恒流源是本单元试验的关键部分。本恒流源具有自动调节,响应迅速,精度高等特点。为了实现调节精度、响应时间、波形等方面的指标,在恒流源的调节部分采用了伺服系统,在传动部分采用了谐波传动技术,在检测部分采用了高精度传感器,在调压部分采用斜槽式感应调压器。

恒流源自动调节原理:调节系统为闭环系统,来自可编程序控制器的给定值(电压给定或电流给定)与来自变送器(电压变送器或电流变送器)的反馈值进行比较,比较结果送入运算部分,运算的结果作为给定送入到伺服放大器的速度给定端。通过控制伺服电动机的转速及方向来控制感应式调压器的电压输出值,从而达到电压或电流调节的目的。

2.4.5 耐压检测

耐压检测单元由条形码阅读器、隔料挡料装置、定位举升装置、二次接线端子加电装置、主电极加电机构及下废料机构等构成。

本单元断路器随托盘到达本工位,设备自动挡料。工件到位后定位举升装置自动升起,自动定位后,与传输线滚筒脱离,夹紧装置自动夹紧工件,二次接线端子加电装置自动与二次回路接线端子连接,主电极加电机构自动与断路器主电极连接。采用1800V的高压对断路器的外壳与二次接线端子之间进行耐压测试;采用3500V的高压对断路器的外壳与主电极之间、相与相之间、每相进出线之间进行耐压测试。断路器闭合与断开操作自动完成。以上检测结束后,若检测合格,工件自动向后边传输,若检测不合格,工作站自动报警提醒操作者,操作者在工件上作标记,以便下料后进行检测。

2.4.6 控制系统组成

所有在线检测单元的控制系统由PLC、触摸屏、气动元件及传感器等组成,所有的检测传感器及开关信号先接到端子箱里,再通过连接电缆接到电控柜中。

总控系统功能:①设定校验参数;②读取设备工作状态数据;③读取每个工作单元的生产检验测试数据;④读取产品条码信息,将测试数据与条码信息一起存盘,保存测试产品数据时间为两年;⑤通过总控系统实现与工厂计算机系统的连接。

参 考 文 献

- [1] 周茂祥. 低压电器设计手册. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [2] 郑铭芳. 低压电器选用维修手册. 2版. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [3] 孟庆龙. 电器结构、工艺及计算机辅助工艺规程设计. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [4] 孟庆龙. 电器制造技术手册. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [5] 刘亚箴. 低压电器国外基本情况. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [6] 方国生, 张玉青. 低压电器及成套开关设备最新引进产品和新产品手册. 北京: 海洋出版社, 2001.
- [7] 万绍尤. 低压断路器. 南京: 江苏科学技术出版社, 1987.
- [8] 何瑞华, 尹天文. 我国低压电器现状与发展趋向. 低压电器, 2004(1)(2).
- [9] 尹天文, 周积刚. 国外低压电器新产品最新发展趋向. 低压电器, 2007(1).
- [10] Paul G. Slade, The Arc and Interruption. In Electrical Contacts principles and applications, Paul G. Slade ed., New York and Basel: Marcel Dekker Inc., 1999; 433-486.
- [11] Ruben D. Garzon, High Voltage Circuit Breakers design and applications, 2nd ed, New York and Basel: Marcel Dekker Inc., 2002. 1-2.
- [12] J. S Townsend. Electricity in Gases. Oxford: Clarendon Press, 1915.
- [13] A von Engel. Ionized Gases. Oxford: Clarendon Press, 1955.
- [14] W. Elenbaas. The High Pressure Mercury Vapor Discharge. Amsterdam: North-Holland, 1951.
- [15] J. M. Sommerville. The Electric Arc. London: Methuen, 1959.
- [16] J. D. Cobine. Gaseous Conductors. New York: Dover, 1958.
- [17] T. H. Lee. Physics and Engineering of High Power Switching Devices. Cambridge, MA: MIT Press, 1975.
- [18] R. Holm, E. Holm. Electric Contacts: Theory and Application. New York: Springer-Verlag, 1967.
- [19] J. M. Lafferty, ed., Vacuum Arcs, Theory and Applications. New York: Wiley-Interscience, 1980.
- [20] M. F. Hoyaux. Arc Physics. New York: Springer-Verlag, 1968.
- [21] T. E. Browne. Circuit Interruption, Theory and Techniques. New York and Basel: Marcel Dekker, 1984.
- [22] 邱毓昌, 施围, 张文元. 高电压工程. 西安: 西安交通大学出版社, 1995: 5-7.
- [23] 周泽存, 沈其工, 方瑜, 等. 高电压技术. 北京: 中国电力出版社, 2004: 19-23.
- [24] 姚宗熙, 郑德修, 封学民. 物理电子学. 西安: 西安交通大学出版社, 1991: 159-170.
- [25] Greenwood. Electrical Transients in Power Systems, 2nd ed., New York: Wiley, 1991.
- [26] 邱关源. 电路. 4版. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [27] Roland S. Timsit, Electrical Contact Resistance: Fundamental Principles, In Electrical Contacts principles and applications, Paul G. Slade ed., New York and Basel: Marcel Dekker Inc., 1999; 1-88.
- [28] Paul G. Slade, The Consequences of Arcing, In Electrical Contacts principles and applications, Paul G. Slade ed., New York and Basel: Marcel Dekker Inc., 1999; 487-534.
- [29] R. Holm. Electrical Contacts, Theory and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 1976.
- [30] J. A. Greenwood. Constriction resistance and the real area of contact. Brit J. Appl. Phys. 17: 1621, 1966.
- [31] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 等. 高压断路器原理和应用. 北京: 清华大学出版社, 2000: 42-75.
- [32] 张冠生. 电器理论基础. 2版. 北京: 机械工业出版社, 1997: 15-34.
- [33] 杨世铭, 陶文铨. 传热学. 3版. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [34] Ruben D. Garzon, High voltage circuit breakers Design and applications, 2nd ed., New York and Basel: Marcel Dekker, Inc., 2002: 55-73.
- [35] 张冠生. 电器理论基础. 2版. 北京: 机械工业出版社, 1997: 52-54.
- [36] Paul G. Slade, The Consequence of arcing, In Electrical Contacts principles and applications, Paul G. Slade ed., New York and Basel: Marcel Dekker L.
- [37] 陈德桂. 低压断路器中的限流新技术. 低压电器, 1990(1): 11-17.
- [38] 刘洪武, 陈德桂, 李兴文, 等. 采用自聚焦透镜的开关电弧运动形态光纤测试系统. 中国电机工程学报, 2003(9): 126-131.
- [39] P. G. Slade. Electrical Contact principle and Applications. New York: Marcel Gekker, 1999.
- [40] 陈德桂. 塑壳断路器的新机种. 低压电器, 1994(5): 13-18.
- [41] 陈德桂. 低压电器的技术进展. 低压电器, 1998(5): 3-10.
- [42] 陈德桂. 面向21世纪的低压电器新技术. 低压电器, 2001(1): 3-8.
- [43] 陈德桂. 低压断路器结构设计的发展动向. 低压电器, 1995(6): 18-23.
- [44] 陈德桂. 新一代塑壳断路器限流技术及其结构特点分析. 低压电器, 2001(6): 3, 6, 11.
- [45] 陈德桂. 低压电器最新发展动态. 低压电器, 2005(1): 37, 54.
- [46] 陈德桂. 气吹灭弧与压力脱扣技术促进了低压断路器开断能力提高. 低压电器, 2003(3): 3-6.
- [47] David W. Branstom. Innovation in Low-Voltage switching technology. proceedings ICEC, Zurich, Switzerland, 2002; 283-289.
- [48] Chen Degui, Chen Xu, Geng Yingsan, et al., Research of Interrupting Process of Low-voltage Circuit Breaker. Proc. of the Int. Conf. on Electrical Contacts, Electromechanical Components and their Applications, Nagoya Japan, July 19-24, 1999; 289-293.

- [49] 陈德桂, 郑新建. 电弧停滞时间的研究与分析. 防爆电器, 1987(1): 29-36.
- [50] 李兴文, 陈德桂, 向洪岗, 等. 低压塑壳断路器中电动斥力的三维有限元非线性分析与实验研究. 中国电机工程学报, 2004(2): 150-155.
- [51] E. Bolbel, M. Lauaire. Behavior of Switching Arc in Low-Voltage Limiter Circuit Breakers. IEEE Trans. On CHMT-8 1985(1): 3-12.
- [52] E. Bolbel, L. Siffroi. Immobility duration of Electrical Arcs Between Contactor Poles at Breaking Instant. Proc. 28th Holm Conference, 1982: 168-170.
- [53] Y. Aoyama, T. Ohada. New Interruption Technique for Low-Voltage Circuit Breakers. Proc. Of 14th International conference on Electric Contact, 1988: 343-348.
- [54] 过增元. 横向磁场作用下自由电弧的温度场与速度场. 工程热物理学报, 1988(4): 338-404.
- [55] R. Amsinck, K. W. Jaeger. Movement and Extinction of Switching Arcs in contactor Quench-Systems. IEEE Trans. on CHMT-2 1979(1): 8-11.
- [56] Y. Aoyama, T. Ohada, T. Togucki, et al. Immobility Phenomena of Switching Arc in Low Voltage Circuit. Proc. of the Int. Conf. on Electrical Contacts, Electromechanical Components and their Applications, 1986: 787-793.
- [57] 陈旭, 陈德桂. 限流断路器开断中弧根运动特性的研究. 上海电器技术, 1998(2): 27-30.
- [58] 陈旭. 低压断路器电弧等离子体数学模型及开断电弧背后转移现象的研究. 西安: 西安交通大学, 2000.
- [59] Degui CHEN, Zhipeng LI, Hongwu LIU. Experimental Investigation of the Influence of Several Factors on the Arc Motion of a Model Quenching Chamber with Gas-Driven Arc. IEICE Transactions on Electronics. AUGUST 2004, E87-C(8): 1336-1341.
- [60] Hartwig Stammberger. Force Calculations for the Movable Contact of Circuit Breakers, 19th internet conf on Electric Contact Phenomena, 14-17 September, 1998 Nuremberg, Germany: 369-374.
- [61] Xin Zhou. Evaluation of Gassing Materials in Switching Devices Using Monochromatic High speed Imaging Technique. IEEE Transactions on Components and packaging Technologies. Vol. 25, 2002(3): 384-389.
- [62] 高桥贯, 三桥孝夫, 和田勇一. 新型塑壳断路器与漏电断路器的新开断技术“ISTAC”. 三菱电机技报, Vol. 69, 1995(4): 353-357.
- [63] Xingwen Li, Degui Chen, Hongwu Liu, et al. Imaging and Spectrum Diagnostics of Air Arc Plasma. Characteristics IEEE Transactions on Plasma Science, December, 2004, 32(6): 2243-2249.
- [64] 陈德桂. 低压断路器器壁侵蚀与自动气吹灭弧新技术的研究. 低压电器, 2002(4): 3-6.
- [65] M. Tsukima, T. Mitsuhashi, M. Takahashi, et al. Low-voltage Circuit Breaker using Auto-puffer Interruption Technique, T. IEE Japan, Vol. 122-b, 2002(9): 969-975.
- [66] 袁海文, 陈德桂. 微型低压限流器跑弧区磁场的计算及其对限流特性的影响. 西安交通大学学报, 1996(3): 19-25.
- [67] Chen Degui, Yuan Haiwen, Chen Xu. Research of Arc Movement for Low-Voltage Current Limiter by Using Two-Dimension Fiber Array Digital Measuring System. Proc. of 8th Int. Conf. on “Switching Arc Phenomena”, Lodz, Poland, 3-6, Sept., 1997: 66-70.
- [68] 刘洪武. 低压电器中的电弧运动及其测试设备的研究. 西安交通大学, 2005.
- [69] 陈勇. 低压限流断路器开断过程中电弧运动及重击穿现象的研究. 西安: 西安交通大学, 1993.
- [70] 陈旭, 陈德桂. 低压限流断路器背后击穿现象的数值模拟. 中国电机工程学报, 2000(3): 16-19.
- [71] 陈旭, 陈德桂, 耿英三. 低压断路器中电弧运动磁流体动力学模型的仿真研究. 西安交通大学学报, 1999(10): 6-9.
- [72] 陈旭, 陈德桂. 低压断路器中电弧运动形态的研究. 低压电器, 2000(1): 9-11.
- [73] 陈德桂. 低压断路器开断过程中触头间隙重击穿现象的研究. 低压电器, 1993(6): 11-15.
- [74] 陈德桂. 低压断路器电弧背后击穿现象的研究. 低压电器 1999(6): 7-10.
- [75] 陈旭, 陈德桂. 新型灭弧系统对背后击穿现象抑制的研究. 电工电能新技术, 1999(2): 10-13.
- [76] 陈勇, 陈德桂, 邱祖述, 等. 低压限流断路器开断过程重击穿现象及防止措施. 电工技术学报, 1995(3): 43-46.
- [77] 陈勇, 陈德桂. 电弧运动通道对低压限流断路器开断过程重击穿现象的影响. 西安交通大学学报, 1995, Vol. 29(4): 1-6.
- [78] M. Lindmayer. Simulation of Stationing Current Voltage Characteristics and of Back Commutation in Rectangular Arc Channels. 17th International Conference on Electrical Contacts. Nagoya, 1994. : 835-845.
- [79] E. Gauser, W. Rieder. Back. Commutation in Low Voltage Interrupters: Influence of Electrical Contacts, 1997.
- [80] C. Fievet, et al. Optical Diagnostics and Numerical Modeling of Arc Restrikes in Low Voltage Circuit Breakers. J Phys D: Appl Phys. 1997: 2991-2999.
- [81] C. Degui, C. Qingrong, et al. Numerical method to simulate the interrupting process of current limiting circuit breaker and its application. In: Proc 7th Int Conf on Switching Arc Phenomena, Lodz (Poland), 1993: 5-8.
- [82] Manfred Lindmayer, Erik Marzahn, Alexandra Mutzke, et al. The Process of Arc-Splitting Between Metal Plates in Low Voltage Arc Chutes. Electrical Contacts. Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts. USA. 2004: 28-34.
- [83] C. Degui, C. Yong, Y. Haiwen. Investigation of Back Commutation Phenomena for Narrow Slot Arc Quenching Chamber in Current Limiting Circuit Break-

- er. Proc. 16th Holm Conf., 1996; 121-128.
- [84] T. Matsumura, Y. Ikuma. Improvement of Current Limiting Performance of a Molded _ Case Circuit Breaker by Mounting an Air-buffer Chamber. T. IEE Japan, 1990, 110-B(3): 420-425.
- [85] John, J. Shea. The Influence of Arc Chamber Wall Material on Arc Gap Dielectric Recovery Voltage, IEEE Trans. On Components and Packaging Technologies, 2001, 24(3): 342-348.
- [86] P. G. Slade. Electrical Contacts. Marcel Dekker, 1999.
- [87] K. Nakayama, Y. Yokomiyu, T. Matsumura, E. Kamamori and K. Kawamuri. Expression of Voltage of High-Current Air Arc Affected by Deion Plates. Proc. Of 14th Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications, 2002, 1: 27-30.
- [88] 陈德桂. 基于现代测试手段的低压灭弧系统研发新技术. 低压电器, 2004(11): 3-7, 14.
- [89] 陈德桂, 刘洪武, 李志鹏. 弧柱压降对塑壳断路器限流性能的作用. 低压电器, 2005(11): 3-7, 14.
- [90] J. J. Shea. The Influnce arc Chamber Wall material on arc gap dielectric recovery voltage.
- [91] Proc. 41th IEEE Holm conf. Electrical contact, Chicago; IL, Sep. 2000; 161-168.
- [92] J. J. Shea. Dielectric Recovery Characteristics of a High Current Arcing Gap. IEEE Transactions on components and packaging Technologies, 2002, 25 (3): 402-408.
- [93] M. Nagte. Breakdown Characteristics of High Temperature Air. Electrical Engineering in Japan, 1984, 104(6): 299-306.
- [94] J. J. Shea. Gassing Arc Chamber Wall Material Effect on Post Current-zero Recovery voltage Breakdown. IEEE Transaction on components and packaging Technologies, March 2004, 27(1): 42-50.
- [95] Chen Degui, Li Xingwen, Dai Ruicheng. Measurement of the Dialectic Recovery strength and Reignition of AC contactors. IEICE Transactions on Electronics, AUGUST 2005, E88-C (8): 1641-1646.
- [96] T. H. Lee. Physics and Engineering of High power switching devices. Cambridge, MA: MIT Press, 1975.
- [97] 陈德桂, 王学军, 辜小川. 多纵缝灭弧介质恢复强度的测量与分析. 低压电器, 1999(2): 9-11.
- [98] 王学军, 陈德桂. 接触弧隙介质恢复强度的测量. 低压电器, 1997(1): 7-11.
- [99] 王学军, 陈德桂. 多纵缝灭弧室中重燃过程的分析与模拟. 电机与控制学报, 1997(3): 164-170.
- [100] Chen Degui, Wang Xuejun, Gu Xiaochuan. Measurement and Analysis of Dielectric Recovery Strength in the Arc Quenching Chamber of Contactor with Different Structure. Proc. Of 8th Int. conf. On "Switching Arc phenomena", Lodz, Poland, Sept. 1997; 43-47.
- [101] 尚振球, 曹均正, 梁九成, 张或民. 测量低压电器弧隙介质恢复强度的新线路. 西安交通大学学报, 1983, 17 (6): 61-66.
- [102] Chen Degui, Wang Xuejun, Gu Xiaochuan. Measurement of the Dielectric Recovery Strength and Analysis of Reignition Process in Deion Plate Chambers of the AC Contactor. Proceedings of International conference on Electrical contacts ICEC, Frankfort Germany, 1998.
- [103] Chen Degui, Wang Xuejun, Gu Xiaochuan. Measurement and Analysis of the Dielectric Recovery Strength in the Arc Quenching Chamber of Contactor with Different Structure. Proc. of 8th Int. Conf. on "Switching Arc Phenomena", Lodz, Poland, 3-6, Sept., 1997; 43-47.
- [104] 王学军. 660V 接触器灭弧系统的研究. 西安: 西安交通大学, 1996.
- [105] 陈德桂. 虚拟样机成为开发新型低压电器的关键技术. 低压电器, 2002(6): 3-7.
- [106] J. Paulke, P. Steinhäuser, H. Weichert. Thermal simulation of switchgear. Proc 47th IEEE Holm Conf Electrical Contacts[C]. Montreal, 2001, 6-11.
- [107] P U Frei, H O Weichert. Advanced thermal simulation of a circuit breaker. Proc 50th IEEE Holm Conf Electrical Contacts[C]. Seattle, 2004. 334-340.
- [108] 纽春萍, 陈德桂, 张敬菽, 等. 交流接触器 E 型电磁铁分磁环的仿真设计. 系统仿真学报[J], 2005, 17(7): 1751-1753.
- [109] 纽春萍, 陈德桂, 朱丽萍. 交流接触器温度场的仿真计算. 低压电器[J], 2005, (6): 6-8.
- [110] 黄琳敏, 陈德桂, 张敬菽. 计及物理参数随温度变化时螺管电磁铁温度场和瞬态热路的仿真分析. 电工技术学报, 2003, 18(5): 27-31.
- [111] H Stammberger. Force calculation for the movable contact of circuit breakers. Proc. 19th Int Conf Electric Contacts[C]. Nuremberg, 1998. 369-374.
- [112] Y Kawase, H Mori, S Ito. 3-D element analysis of electrodynamic repulsion forces in stationary electric contacts taking into account asymmetric shape. IEEE Trans Magn[J], 1997, 33(2): 1994-1999.
- [113] D Chen, H Liu, H Sun, et al.. Effect of magnetic field of arc chamber and operating Mechanism on current limiting characteristics of low voltage circuit breakers. IEICE Trans Electro [J], 2003, E86-C (6): 915-920.
- [114] D Piccoz, P Teste, R Andlauer. The repulsion of electrical contacts crossed by short-circuit currents. Proc. 45th IEEE Holm Conf Electrical Contacts[C]. Pittsburgh, 1999. 129-135.
- [115] B Martin, K Stanislav, N Hassan. Influence of vapour pressure on the dynamics of repulsion by contact blow-off. Proc 21st Conf Electrical Contacts [C]. Zurich, 2002. 268-275.
- [116] X. Zhou, P. Theisen. Investigation of arcing effects during contact blow open process. Proc 44th IEEE Holm conf Electrical Contacts[C]. Arlington, 1998. 100-108.
- [117] Xingwen Li, Degui Chen. 3-D finite element analysis

- and experimental investigation of electrodynamic repulsion force in molded case circuit breakers. IEEE Trans Compon Packag Technol[J], 2005, 28(4): 877-883.
- [118] 李兴文, 陈德桂, 汪倩, 等. 低压电器中气动斥力的实验研究. 中国电机工程学报, 2006, 26(15): 83-88.
- [119] 刘颖异, 陈德桂, 李兴文, 等. 用三维有限元方法研究影响框架断路器电动斥力的方法. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 63-67.
- [120] 陈德桂, 刘庆江, 康艳. 塑壳断路器操作机构分断速度的影响因素. 低压电器[J], 2005(12): 9-12.
- [121] 张敬菽, 陈德桂, 等. 低压断路器操作机构的动态仿真与优化设计. 中国电机工程学报[J], 2004(3): 102-107.
- [122] 张敬菽, 陈德桂, 等. 计及电动斥力效应的低压塑壳断路器机构动力学仿真. 西安交通大学学报[J], 2004(4): 343-347.
- [123] Xingwen Li, Degui Chen, Qian Wang, et al., Investigation on the interruption process of molded case circuit breakers including the influence of blow open force. IEICE Trans Electronics[J], 2006, 89(8): 1187-1193.
- [124] 陈德桂. 磁通变换器的优化设计. 低压电器[J], 2005(9): 7-9.
- [125] Hongguang Xiang, Degui Chen, Xingwen Li, et al., Investigation on the dynamic characteristics of a magnetic release in molded case circuit breaker. IEICE Trans Electronics[J], 2005, E88-C(8): 1647-1651.
- [126] 刘刚, 陈德桂, 向洪岗, 等. 电磁脱扣器动态特性的仿真. 低压电器[J], 2004(1): 13-16.
- [127] 向洪岗, 陈德桂, 李兴文, 等. 基于三维磁场分析建立电磁铁等效磁路的研究. 西安交通大学学报[J], 2003, 37(8): 808-811.
- [128] 周积刚. 漏电断路器的使用、安装与维护: 漏电保护技术文集. 上海: 上海电器科学研究所低压电器编辑部编, 1985.
- [129] 候根法. 电磁式漏电开关中的漏电脱扣器: 漏电保护技术文集. 上海: 上海电器科学研究所低压电器编辑部编, 1985.
- [130] 梁静, 周积刚, 等. 剩余电流断路器在安装和使用中应注意的事项. 低压电器, 2005(2): 47-51.
- [131] (德)Gornter G. Seip. 电气安装技术手册. 胡明忠, 胡沫非, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [132] 曲德刚. 从技术与标准发展趋势谈合理选择与使用 ATSE. 建筑电气设计通讯. PC 级自动转换开关电器专集, 2005(4).
- [133] 顾惠民, 周积刚, 等. 国外新一代塑壳断路器的现状和发展动向. 低压电器, 2006(2): 7-11.
- [134] 尹天文, 周积刚, 等. 从德国工业博览会看世界低压电器发展趋势. 低压电器, 2003(2): 3-6.
- [135] D. W. Branston. Innovation in Low-Voltage Switching Technology, 21st International Conference on Electrical Contacts Switzerland 2002: 283-289.
- [136] P. Mechler. Simulation of AC Arc Faults in Aircraft Electrical Networks, 21st International Conference on Electrical Contacts Switzerland 2002: 290-295.
- [137] E. Hetymann, J. C. Zuercher, J. K. Hastings. Method for Realistic Evaluation of Arc Faults Detection Performance, 21st International Conference on Electrical Contacts Switzerland 2002: 296-302.
- [138] 杨兴瑶. 低压电器、控制线路和网络通信. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [139] 冯晓, 刘仲恕. 电机与电器控制. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [140] 任致程. 实用电动机控制电路 350 例. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
- [141] 袁任光, 张伟武, 等. 电动机控制电路选用与 258 实例. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [142] (德)Klaus Kosack. 低压开关电器和开关设备手册: 选用准则与设计指南. 胡明忠, 胡沫非, 译. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [143] 何瑞华, 胡景泰, 曾萍. 交流接触器发展概况. 电力系统装备, 2005(10).
- [144] 许志红, 张培铭. 智能交流接触器零电流分断控制技术. 电工电能新技术, 2002(10).
- [145] 田新疆. 暖通空调和制冷设备专用接触器的特点、标准及典型试验. 机床电器, 2004(3).
- [146] 胡景泰, 曾萍, 等. 可通讯智能化控制与保护开关电器(CPS)的发展与应用. 低压电器, 2003(5).
- [147] 胡景泰. 电控系统控制与保护统一理论及其信息化研究. 同济大学博士论文, 2006.
- [148] 蒋容兴. 模数化终端电器选用指南. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [149] 邱传睿. 我国的防雷产业与入世后的发展浅探. 防雷世界, 2004(2): 18-23.
- [150] 钟万强, 肖稳安. 中国重大和典型雷电灾害的分析与预测. 雷电防护与标准化, 2003(2): 11-17.
- [151] Peter Hasse. 低压系统防雷保护. 2 版. 傅正财, 叶蜚誉, 译. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [152] 张南法. 正确认识压敏电阻器. 中国电子学会敏感技术分会电压敏学术年会, 青岛, 2005.
- [153] 许颖. WGM0A 正名和新技术条件要求. 中国雷电与防护, 2003(2): 1-4.
- [154] 王厚余. 低压电气装置的设计安装和检验. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [155] 杨天义. 防雷击电涌保护器(SPD)的选择和应用. 防雷世界, 2003(12): 83-96.
- [156] 张南法. MOV 型 SPD 的限制电压及其测量. 雷电防护与标准化, 2004(3): 94-100.
- [157] 陶明, 蔡振新, 臧绪运. 低压电网中 3+1 组合避雷器的优点与隐藏的缺陷分析. 第四届中国国际防雷论坛, 上海, 2005. 10.
- [158] Andrew S. Tanenbaum. 计算机网络. 熊桂喜, 王小虎, 译. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [159] 阳宪惠. 现场总线技术及其应用. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [160] 邹宽明. 现场总线技术应用选编. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.

第3篇 低压成套开关设备和 控制设备

主编单位：天津电气传动设计研究所

主 编：陈雪梅 郭保良 程玉标 滕 文 张卫东

主 审：文念祖 龙 静

编写人员：郭保良（天津电气传动设计研究所）

陈雪梅（天津电气传动设计研究所）

龙 静（天津电气传动设计研究所）

田秀珍（天津电气传动设计研究所）

刘 霞（天津电气传动设计研究所）

刘淑敏（天津电气传动设计研究所）

赵晓华（天津电气传动设计研究所）

赵 静（天津电气传动设计研究所）

张春香（天津电气传动设计研究所）

刘振东（天津电气传动设计研究所）

周 静（天津电气传动设计研究所）

滕 文（北京索控欣博通电气有限公司）

张卫东（天津电气传动设计研究所）

王柄林（浙江三辰电器有限公司）

王春华（常熟开关制造有限公司）

管瑞良（常熟开关制造有限公司）

刘 镇 (天津万德福变频技术应用开发有限公司)
李建新 (天津万德福变频技术应用开发有限公司)
张宗江 (古河电业)
南 寅 (北京人民电器厂)
赵志群 (北京人民电器厂)
盛庆伟 (天津市红日电气自动化有限公司)
程玉标 (苏州万龙集团有限公司)
管允文 (上海市嘉定区华通电器厂)
童国强 (上海向阳电气公司)
张菊英 (上海四通电器厂)

第1章 概 论

1 概述

1.1 低压成套开关设备和控制设备定义

低压成套开关设备和控制设备（简称成套设备）是指在低压电网中用于传输电能、分配电能的发、输、配电和控制电能消耗的电力设备。低压成套开关设备和控制设备是由一个或多个低压开关设备和与之相关的控制、测量、信号、保护、调节等设备，由制造商（生产厂）负责将其所有内部的电气和机械连接，用结构部件完整地组装在一起的组合体。再通俗地讲：是由一个或多个（种类和数量）低压电器，熔断器，控制与保护电器，漏电保护电器，其他电子、微电子集成件（如果有的话），用导体（母排、电缆或导线）、接线端子等连接成一个能完成电能输、配、用电任务的，并安装于一保护壳体内部的单体或/和组合体（成套设备）。例如在工厂、企业、写字楼、商住楼和工业装备、建筑工地中广泛应用的开关板、屏（柜），动力柜，照明箱（板），控制柜（箱），无功功率补偿柜（箱）以及起着电能传输（一定的分配）作用的母线干线系统（母线槽），电缆桥架和完成电能接收、变换、分配集一体的箱式变电站，电缆分线箱，固定或移动式成套开关设备等。

1.2 低压成套开关设备和控制设备的技术参数范围

低压成套开关设备和控制设备的技术参数范围为：额定电压为交流不超过 1000 (1140) V，频率不超过 1000 Hz，额定电压为直流不超过 1500 V。

1.3 低压成套开关设备和控制设备质量保证的技术措施和手段

为保证电力系统的输、配电及电能转换正常、高效、节能工作，低压成套开关设备和控制设备质量起到关键的作用，必须做到设计合理，产品制造符合标准，通过严格的型式试验验证等必要的技术措施和手段，才能确保成套开关设备在电力系统中可靠、稳定、安全、经济运行。

必要的技术措施和手段：

(1) 进行合理设计。在满足安全、节能的条件下，应根据系统容量及用户具体输、配电使用情况进行系统设计，合理选择系统中各级配电线路的电气元器件及相关技术参数，可利用各种连接方法及电子技术、智能化技术来达到使用安全、高效。

(2) 落实技术要求。保证电气绝缘配合（电气间隙、爬电距离、隔离距离），工频过电压、雷击浪涌保护，短路强度，接地保护，屏蔽（如有需要），温升保护，防触电保护等安全、可靠性技术指标，应符合国家工业电气、建筑电气等各类标准中的安全技术要求。

(3) 制造与装配（组装）。产品工艺应采用先进技术，应遵照相关作业指导书操作，做到规范、高效，从材料选择、板材加工、组装配线、外壳加工等各方面应符合产品性能及安全防护要求，并满足不同使用环境、条件要求。

(4) 完善检验。产品还必须通过型式试验（TTA）或部分型式试验（PTTA）。产品只有通过了 TTA 或 PT TA 试验，才能确认产品设计、性能及制造水平是否满足相应技术标准和法规要求；或者确认是否能达到与设计定型的产品不存在有影响性能的差异。

1) 型式试验设备（Type-tested Low-Voltage Switchgear and Controlgear Assembly）：符合一种确认的型号或系列的低压成套开关设备和控制设备，它与经验证认为符合有关标准的定型成套设备相比，不存在可能影响性能的差异。

2) 部分型式试验设备（Partially Type-tested Low-Voltage Switchgear and Controlgear Assembly）：一种低压成套开关设备和控制设备，它既包括通过型式试验的设备，也包括未经型式试验的设备，而后者是从符合有关试验的通过型式试验的设备派生（如通过计算）出来的。

由于多种原因，如运输或生产原因。成套设备的某些工序可以在制造厂以外的地方完成。只要这些成套设备是按照制造商的规定完成的，而这些规定确实保证已定型的类型或系列成套设备符合标准，其中包括出厂试验，这样的成套设备可视为通过型式试验设备。

3) 产品性能差异是指：①结构形式，包括零部件、尺寸变化、焊接（组装）方式等；②母线截面变更、根数的变化；③母线支撑件（母线框、母线架）及垫块的数量、材料，相邻母线支撑件的间隔距离；④主要保护器件（断路器、熔断器）的变更（同一型号、不同生产企业产品或相同规格不同型号产品视之为变更）、隔室容积的减少等。

2 组成与分类

2.1 组成

低压成套开关设备和控制设备由下列部分组成：

(1) 低压成套开关设备。开启式开关设备、封闭式开关设备、柜组式开关设备、台式开关设备、箱式开关设备、箱组式开关设备、抽出式开关柜、固定分隔式开关柜、密封式开关柜、智能型低压成套设备等。

(2) 低压动力配电柜（箱）。各类动力配电柜、交流电动机起动柜、组合式动力柜、建筑消防用动力柜、电源转换箱、建筑工地用动力柜、户外多功能动力配电柜、应急电源（EPS）等。

(3) 母线干线系统（母线槽）。密集型母线槽、空气型母线槽、加强型母线槽、带专用散热外壳空气型母线槽、防火型母线槽、防水型母线槽等。

(4) 照明配电箱（板）。照明箱、计量箱、插座箱等。

(5) 建筑工地用成套设备（ACS）。主配电 ACS、配电用 ACS、变压器 ACS、终端配电用 ACS、插座出线式 ACS 等。

(6) 动力配电网用电缆分线箱（CDCs）。电缆分线箱，电缆接地汇接箱，高层建筑电缆 T 接、II 接箱，电位接线盒等。

(7) 智能型低压成套设备。

(8) 直流开关设备、智能型直流柜、采用蓄电池的直流柜及采用双电层电容器的直流柜。

(9) 交流电动机软起动控制设备。

(10) 低压无功功率补偿设备。无功功率补偿控制器，无功静、动态补偿装置等。

(11) 谐波抑制和滤波装置。晶闸管式静止型动态无功补偿系统、全控式静止型动态无功补偿系统、饱和电抗器式静止型动态无功补偿系统、智能集成优化节能补偿系统以及电能质量补偿设备等。

(12) 电缆桥架。钢制、铝制、玻璃钢制、耐火桥架、组合式桥架，金属吊装配线槽、桥架的辅助设备等。

(13) 高压/低压预装式变电站（简称箱变）。它是低压开关设备的重要组成部分。它包括低压开关设备和控制设备，高压开关设备和控制设备，电力变压器，辅助设备组装为一体化的成套设备等。

(14) 低压成套辅助设备。

1) 接线辅件：接线端子排，连接器（接插件），铜制压接端头（裸端头、预绝缘端头）等。

2) 配线辅件：行线槽，捆线带，缠绕管，保护带，保护圈，绝缘套，吸盘，线夹，符号牌，标记牌，接线号等。

3) 结构辅件：母线支撑件，门锁，铰链，手柄，通风窗等。

(15) 空壳体。用以安装低压成套开关设备和控制设备的单体或/和组合体（成套）式的保护壳体。

2.2 分类

低压成套开关设备和控制设备按下述特点分类：

(1) 外形设计和外壳材料。例如开启、固定、封闭、柜、柜组、台、箱、箱组、钢及复合材料。

(2) 安装场所、安装条件。例如户内式、户外式、固定式、可移式。

(3) 外壳防护形式。例如普通防护封闭式 IP30、密封式 IP54、气密式 IP65。

(4) 安装方法。例如固定式部件，可移式部件，抽出式部件等。

(5) 对人身的防护措施。

1) 电击防护——防直接接触防护或防间接接触防护。

防直接接触防护有：带电部件的绝缘防护、利用挡板或外壳进行防护、利用屏障进行防护。

防间接接触防护有：利用保护电路进行防护，采用保护电路以外的防护措施——电路的电气隔离、完全绝缘，成套设备内部操作与维修通道。

2) 经过允许的人员接近运行中的成套设备的要求，对进行检查及类似操作而接近成套设备的要求，对进行维修而接近成套设备的要求，在带电情况下为扩展设备而接近成套设备的要求。

(6) 内部隔离形式（主母线、出线单元、配电母线与功能单元之间是否有挡板或隔板隔离）分4种。形式1、形式2a、形式2b、形式3a、形式3b、形式4a、形式4b，见图3.1-1。

形式1：无内部隔离。

形式2：母线与功能单元隔离。

形式3：母线与功能单元隔离，所有的功能单元相互隔离，外接导体的端子与功能单元隔离，但端子之间相互不

隔离。

形式4：母线与功能单元隔离，并且所有的功能单元相互隔离，也包括作为功能单元组成部分的外接导体的端子。

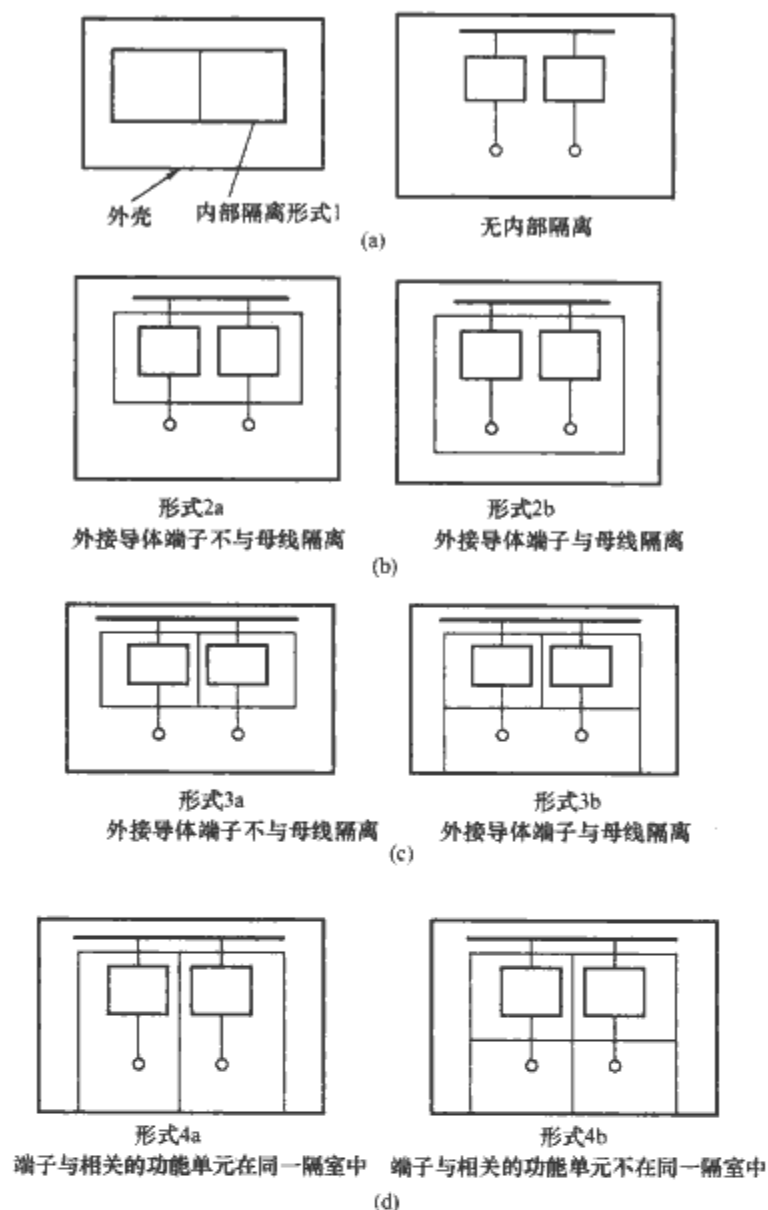


图 3.1-1 成套设备的内部隔离形式

(a) 形式1；(b) 形式2；(c) 形式3；(d) 形式4

(7) 功能单元的电气连接形式（固定连接、可分离连接、可抽出连接）。

3 标准体系

3.1 低压成套开关设备和控制设备的标准基本体系

低压成套开关设备和控制设备的标准基本体系见图3.1-2。

3.2 低压成套辅助设备标准体系

为使低压成套辅助设备的各类辅件的设计、试验、生产规范化，低压成套开关设备和控制设备标委会制订了低压成套辅助设备标准，辅助设备标准体系见图3.1-3。

相关标准：是指与低压成套开关设备和控制设备及低压成套辅助设备有关的标准。它是基本标准的引用标准，以及为满足特殊需要，产品供应商与用户之间协议增加的标准。根据标准规定，引用标准是标准的组成部分，协议增加的标准是标准的组成部分。协议的内容根据标准，如在寒带使用的成套设备、在海拔超过1000m使用的电子设备、特殊使用条件、电磁辐射的干扰、设备扩展等。

4 技术要求

低压成套开关设备和控制设备按 GB 7251.1 的规定，有

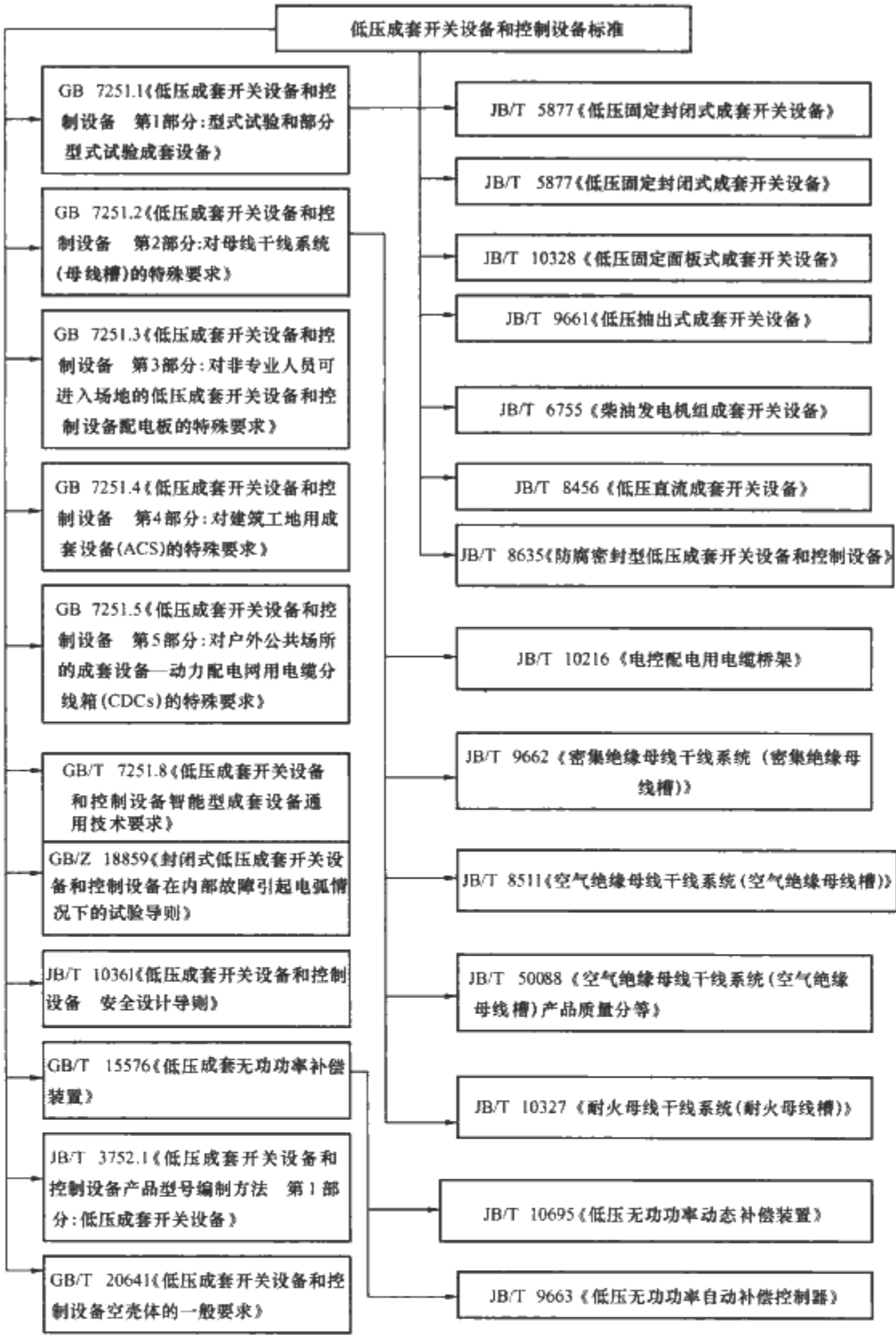


图 3.1-2 低压成套开关设备和控制设备的标准基本体系图

如下的技术及电气性能要求。

4.1 额定电压（成套设备中一条电路的）

4.1.1 额定电压

- (1) 额定工作电压 (U_N)。是指和该电路中的额定电流共同决定设备使用的电压值。对于多相电路，是指相间电压。
- (2) 额定绝缘电压 (U_i)。决定成套设备一条电路介电试验电压和爬电距离的电压值，成套设备任何一条电路的最大额定工作电压不允许超过其额定绝缘电压。成套设备任一电路的工作电压，即使是暂时的，也不得超过其额定绝缘电压的 110%。
- (3) 额定冲击耐受电压 U_{imp} 。在规定试验条件下，成套设备的电路能够承受的规定波形和极性的脉冲电压峰值，电气间隙值参照此电压值确定。成套设备中一条电路的额定冲

击耐受电压应等于或高于成套设备所在系统中出现的瞬态过电压规定值。

4.1.2 标准电压的分类

根据我国现行供电系统标准，可供选择的标准电压见表 3.1-1。

表 3.1-1 标准电压的分类	
	三相四线系统或三相三线交流系统标称电压值及电气设备的额定电压值
电压值	220V/380V (230V/400V) /660V
	1000V (1140V)

对于交流电压小于 380V 以及直流小于 1500V 的电气设备额定电压值见表 3.1-2。

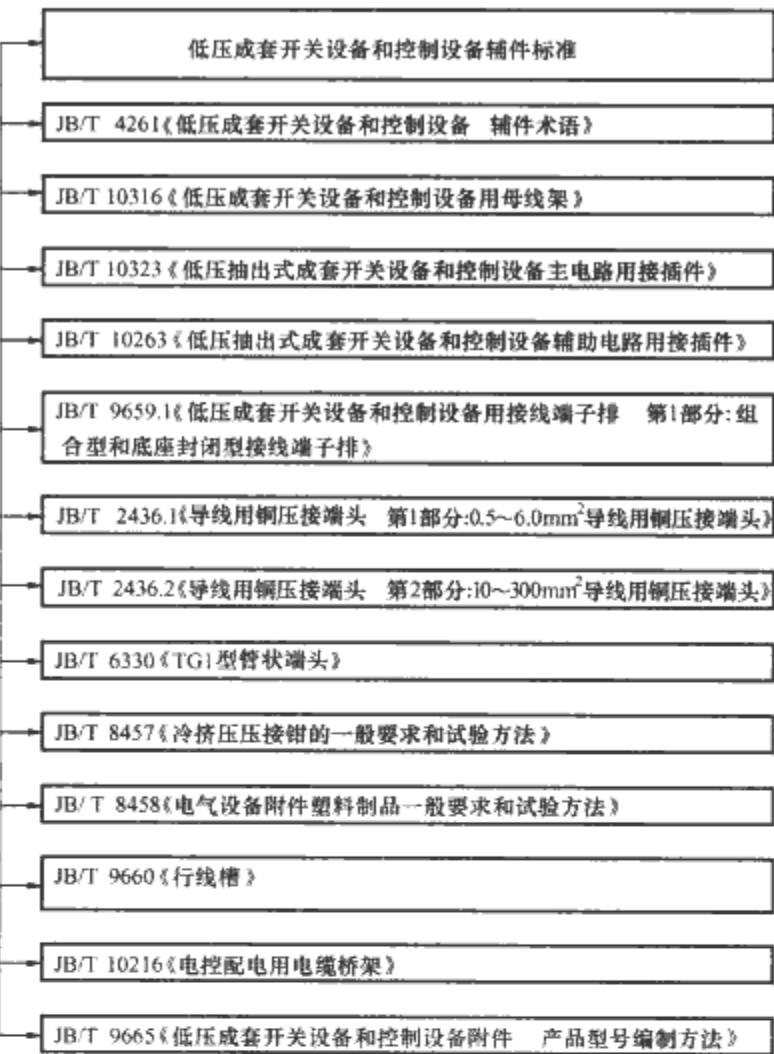


图 3.1-3 低压成套辅助设备标准体系图

表 3.1-2 交流电压小于 380V 以及
直流小于 1500V 的电气设备额定电压值 V

直流电压值		交流电压值	
优先值	补充值	优先值	补充值
—	1.2	—	—
1.5	—	—	—
2	—	—	—
—	2.4	—	—
3	—	—	—
—	4.5	—	—
—	5	—	5
6	—	6	—
—	9	—	—
12	—	12	—
—	15	—	15
24	—	24	—
—	30	—	—
36	—	36	—
—	—	—	42
48	—	48	—
60	—	—	60
72	—	—	—
—	—	—	100
110	—	110	—
—	—	—	127
160	—	—	—
220	—	220	—
—	—	380	—
—	400	—	—
440	—	—	—
—	630	—	—
800	—	—	—
1000	—	—	—
—	1250	—	—
1500	—	—	—

4.1.2.1 主电路电压

主电路的标准电压 (V) 通常选择 220 (230), 380 (400), 660 (690), 750, 1140 (1200) 五个等级。

4.1.2.2 控制电路电压

控制电路也称辅助电路, 它的标称电压也可取与主电路的标称电压不一致。辅助电路常用标称电压见表 3.1-3, 通常使用, 交流电压 (V): 220, 110, 48, 24, 直流电压 (V): 250, 220, 110, 48, 24。

辅助电路常用标称电压 V	
交流电压	直流电压
24	24
48	48
110	110
—	125
127	—
220	220
230	—
—	250
380	—

4.2 额定电流

4.2.1 额定电流 I_N

成套设备某一条电路的额定工作电流由制造商根据其内装电气设备额定值、温升是否合格的电流值, 及其布置和应用情况来确定。

4.2.2 额定短时耐受电流 I_{cw}

是指由制造商给出的, 该电路在规定的试验条件下能安全承载的短时耐受电流方均根值。除非制造商另外规定, 通常该时间为 1s。对于交流, 此电流值是交流分量的方均根值, 并假设可能出现的最高峰值不超过此方均根值的 n 倍。系数 n 的标准值见表 3.1-4。

系数 n 的标准值		
短路电流的方均根值 I (kA)	$\cos\varphi$	n
$I \leq 5$	0.7	1.5
$5 < I \leq 10$	0.5	1.7
$10 < I \leq 20$	0.3	2
$20 < I \leq 50$	0.25	2.1
$I > 50$	0.2	2.2

注 表中的值适合于大多数用途。在某些特殊的场合, 例如在变压器或发电机附近, 功率因数可能更低。因此, 最大的预期峰值电流就可能变为极限值以代替短路电流的方均根值。

4.2.3 额定峰值耐受电流 I_{pk}

一条电路在规定的试验条件下 (见 GB 7251.1—2005 的 8.2.3 条), 由制造厂给出能承载的短时耐受峰值电流, 试验时间通常为 0.1s。

4.2.4 额定限制短路电流 I_{sc}

成套设备一条电路在规定的试验条件下, 由制造厂给出的保护器件及其装置动作时间内能承受的预期短路电流值。

4.2.5 额定熔断短路电流 I_{ef}

成套设备一条电路 (当短路保护器件是熔断器时) 的额定限制短路电流值。

4.3 额定分散系数

额定分散系数是，成套设备或成套设备选定部分在任一时刻所有主电路通过的电流最大值的总和与该成套设备或成套设备所选定部分的所有主电路额定电流总和的比值。如果制造厂给出了额定分散系数，温升试验时，按给定的系数加载电流，进行温升试验，如未给定，可按表 3.1-5 和表 3.1-6 给定的额定分散系数，进行温升试验。

表 3.1-5 给出的额定分散系数适用于除配电板（照明箱）以外的成套开关设备，表 3.1-6 给出的额定分散系数适用于配电板（照明箱）。

表 3.1-5 额定分散系数 1	
主电路数	分散系数
2 与 3	0.9
4 与 5	0.8
6~9	0.7
10 及以上	0.6

表 3.1-6 额定分散系数 2	
主电路数	分散系数
2 与 3	0.8
4 与 5	0.7
6~9	0.6
10 及以上	0.5

4.4 额定频率

(1) 成套设备额定频率是指设备标明的与工作条件有关的频率值。如果成套设备的电路选用了不同的频率值，成套设备并依此而设计，则应给出各条电路的额定频率值。频率值应限制在内装元器件相应的国家标准范围内。成套设备额定频率，如果成套制造厂没有其他规定，允许限制在 98%~102% 的范围内。

(2) 根据我国现行电网运行的频率为 50Hz（依据 GB/T 1980《标准频率》）。对电气设备选择的标准工作频率规定为：

- 1) 电气设备的标准频率值从 50~1000Hz。
- 2) 其数值序列有（Hz）：50（60），100，150，200，250，300，400，500，600，750，1000。

4.5 空壳体的一般要求

空壳体是用户在安装开关设备和控制设备元件之前的产品，用于支撑与安装电气设备。长期以来，用于安装成套设备的壳体没有单独的技术要求和它的型式试验方法。为了适应成套设备整体的技术要求，GB/T 20641—2006（IEC 62208：2002）《低压开关设备和控制设备空壳体的一般要求》，系统地提出其内部空间能对外界影响提供适当的防护，且规定了接近或接触带电器件及接触可移式部件的防护等级，给出了定义、术语、分类，提供壳体资料、使用条件、设计和结构、型式试验等要求，详见第 15 章。

4.6 提供的资料

4.6.1 铭牌

- 每个成套设备应配备一至数个铭牌。
- (1) 符合 GB 7251.1、GB 7251.2、GB 7251.3、GB 7251.5 标准的产品铭牌至少满足以下要求：
 - 1) 制造厂（对完整的成套设备承担责任的机构）名称

- 或商标。
- 2) 型号或标志号，或其他标记。
 - 3) 产品标准。
- (2) 符合 GB 7251.3、GB 7251.4 标准的产品铭牌还应满足以下要求：
- 1) 额定电流以及电流为交流时的额定频率。
 - 2) 额定工作电压。
 - (3) 以下内容必须出现在技术说明书中：①制造厂名称或商标；②型号或标志号；③符合标准，例如 GB 7251；④电流类型；⑤额定工作范围；⑥额定绝缘电压；⑦辅助电路的额定电压；⑧工作范围；⑨每条电路的额定电流；⑩短路耐受强度；⑪防护等级；⑫对人身的防护措施；⑬户内使用条件；⑭为成套设备所设计的接地形式；⑮外形尺寸；⑯质量；⑰内部隔离形式；⑱功能单元的电气连接形式；⑲环境 1 或环境 2（是指成套开关设备面对电磁兼容-EMC 时的环境条件）。
 - 1) 环境 1：主要与低压公共电网有关，例如，在居民区、商业区和轻工业区安装使用。本环境不包括强干扰源，如，弧焊机。
 - 2) 环境 2：主要与非低压公共电网或工业电网有关，包括强干扰源。
- 4.6.2 标志
- 在成套设备内部，应能辨别出单独的电路及其保护器件。如要标明成套设备电器元件的项目，所用的标记应与随同成套设备一起提供的接线图上的标记一致，而且应符合 GB 5094（IEC 60750）电气技术中的项目代号，在图、表格、说明书、标志中，按符合规定的项目代号的组成方法 and 应用原则使用。
- 4.6.3 安装、操作、使用说明书
- 制造商的技术文件和产品目录中，规定成套设备及设备内电器元件的安装、操作和维修条件。如果有必要，成套设备的运输、安装和操作说明书上应指出某些方法，这些方法对合理地、正确地安装、交付使用与操作是极为重要的。必要时，上述文件中应给出推荐的维修范围和维修周期。如果电器元件的安装排列使电路的识别不很明显，则应提供有关资料，诸如接线图或接线表。
- 4.6.4 制造商与用户之间的协议项目
- (1) 额定分散系数。
 - (2) 在寒带使用的成套设备。
 - (3) 在海拔超过 1000m 使用的电子设备。
 - (4) 特殊使用条件。
 - (5) 电和电磁辐射的干扰。
 - (6) 运输、储存和安装条件。
 - (7) 外接导线端子。
 - (8) 安装所要求的防护等级，对于地面安装的成套设备同时应给出底部的防护等级。
 - (9) 对直接接触防护措施的选择。
 - (10) 对间接接触防护措施的选择。
 - (11) 经过允许的人员接近运行中的成套设备。
 - (12) 进行检查和类似操作而接近成套设备。
 - (13) 进行维修而接近成套设备。
 - (14) 在带电情况下为扩展设备而接近成套设备。
 - (15) 用于大功率旋转电动机的几个进线单元或出线单元的预期短路电流值短路保护电器的协调。
 - (16) 插入式连锁。
 - (17) 可移式部件或抽出式部件拆除以后的防护等级。

- (18) 隔离形式。
- (19) 电子设备电源输入的变化。
- (20) 电源频率的偏差。
- (21) 试验电流值高于 3150A 时的温升试验。
- (22) 温升试验的环境温度。
- (23) 短路试验时中性母线的电流值。
- (24) 在现场重复进行通电操作试验。

为了做到这些技术要求，本章对低压电力系统和低压成套开关设备控制设备涉及的有关知识和基本概念，如低压电力系统接地方式、安全防护、电击防护、绝缘配合等，基本的共性的问题以及低压配电工程的前沿发展方向—电能质量补偿做些简单介绍。

5 低压电力系统接地方式

5.1 接地

所谓接地，就是将“广阔的大地”看作基准电位（零电位），凡是与大地进行导电连接的部件均处于“零电位”。例

如：电气设备的壳体直接与“零电位”相连接，这样凡与大地进行连接的部件均处于这种零电位。这样使得站在大地连接点周围的人可触及电气设备的壳体，即使发生机壳带电的情况，也可认为是处在同等电位，从而避免发生危险的接触电压，造成电击事故。人站立在接地点与电气设备安装点的区域内，通过电位平衡，在故障情况下几乎具有同等电位，这个区域可以从邻近接地体周围一直延伸到用电设备供电系统的全部范围。

接地是间接接触保护技术的一部分，是间接接触保护的基本措施之一。

接地系统的另一个任务是：在发生壳体连接时，例如，TT 系统中保证保护装置接入剩余电流保护装置（RCD）或过电流保护装置的脱扣动作。

5.2 低压系统的接地方式

电力系统的接地方式有三种，TN、TT 和 IT 系统，见图 3.1-4 电力系统的接地方式。

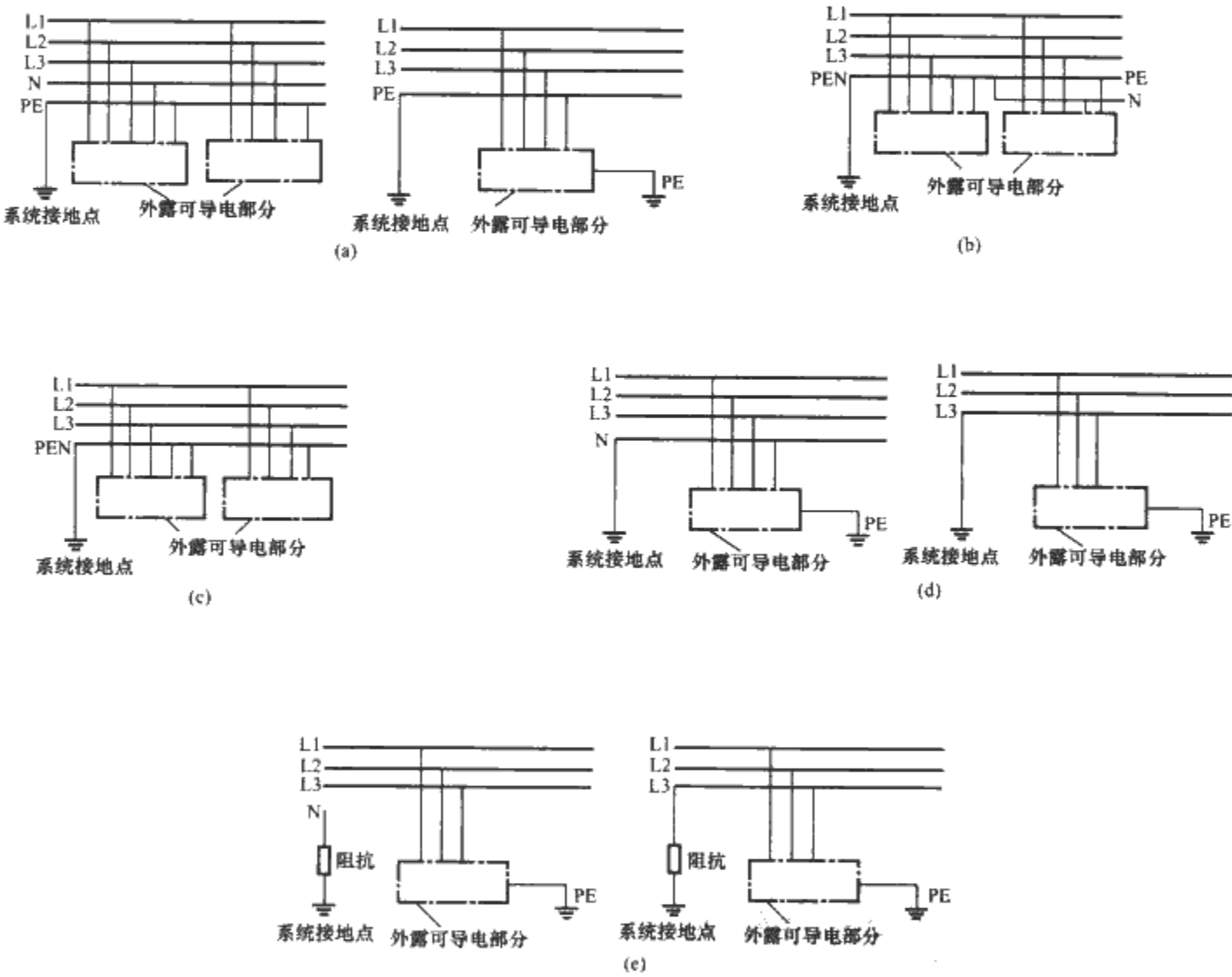


图 3.1-4 电力系统的接地方式
(a) TN-S 系统；(b) TN-C-S 系统；(c) TN-C 系统；(d) TT 系统；(e) IT 系统

5.2.1 TN 系统

有一点直接接地，电气装置的外露可导电部分通过保护中性导体或保护导体连接到此接地点。根据中性线 N 与保护导体 PE 的配置，TN 系统又分为：TN-C、TN-S 和 TN-C-S 接地系统。

- (1) TN-S 系统：整个系统的中性导体和保护导体是分开的。
- (2) TN-C 系统：整个系统的中性导体和保护导体是合一的。
- (3) TN-C-S 系统：系统中一部分线路的中性导体和保

护导体是合一的。
TN 系统在系统中装设的保护电器的特性和回路阻抗 Z_s 应满足式 (3.1-1)
$$Z_s I_a = U_0 \tag{3.1-1}$$
式中： Z_s 为故障回路阻抗； I_a 为保证保护电器在规定的时间内自动动作切断的电流； U_0 为对地标称电压。
TN-C 系统：不能装设漏电保护器，若必须装，应将接地形式由 TN-C 改装成 TN-C-S。
TN 系统主要由过电流保护动作保护器提供电击保护，否则应采用辅助等电位接地连接措施，也可装设剩余电流动

作保护器。

5.2.2 TT 系统

电源端有一点直接接地，电气装置外露可导电部分直接接地，此接地点在电气上独立于电源端的接地点。

TT 系统所装设的用于间接接触电防护的保护器特性和电气装置外露可导电部分与大地之间的电阻值应满足式 (3.1-2)

$$R_a I_a \leq 50V \tag{3.1-2}$$

式中： R_a 为电气装置外露可导电部分与大地之间的电阻值； I_a 为系统出现接地故障时，保证保护电器能自动动作切断的电流。

当保护电器为漏电保护器时，式 (3.1-2) 中 I_a 为额定漏电动作电流。

当保护电器为过电流保护器时， I_a 为下述两者之一：

(1) 对具有反时限特性的保护电器，为保证电器在 5s 内自动跳闸的动作电流。

(2) 对具有瞬时动作特性的保护电器，为保证瞬时动作的最小电流。

5.2.3 IT 系统

电源端的带电部分不接地或有一点通过一个阻抗接地，电气装置的外露可导电部分直接接地。

基本要求：IT 系统发生相导体与外露可导电部分（或地）之间的第一次阻抗可以忽略的故障时，若能满足下列条件，则不一定要切断供电。此条件是

$$R_a I_d \leq 50V \tag{3.1-3}$$

式中： R_a 为电气装置外露可导电部分与大地之间的电阻值； I_d 为相导体与外露可导电部分（或地）之间的第一次阻抗可以忽略的故障电流。

IT 系统在发生第一次故障后又发生第二次故障时的切断供电的保护条件，取决于下述外露可导电部分与保护导体的连接情况：

(1) 当外露可导电部分单独或成组接地时，保护条件应按照 TT 系统确定。

(2) 当外露可导电部分用保护导体互相连在一起接地时，保护条件符合以下两种条件时按 TN 系统确定。

IT 系统无中性导体引出时，必须满足以下条件

$$Z_s = \frac{\sqrt{3}U_0}{2I_a} \tag{3.1-4}$$

IT 系统有中性导体引出时，必须满足以下条件

$$Z'_s = \frac{U_0}{2I_a} \tag{3.1-5}$$

式中： U_0 为相线与中性线之间的交流标称电压，V； I_a 为符合表 3.1-7 规定的切断时间或故障回路在 5s 时间内保护电器的动作电流，A； Z_s 为包括相导体和保护导体在内的故障回路阻抗， Ω ； Z'_s 为包括中性导体和保护导体在内的故障回路阻抗， Ω 。

IT 系统在第二次故障时的最长切断时间见表 3.1-7。

表 3.1-7 IT 系统在第二次故障时的最长切断时间

装置的标称电压 (V)	切断时间 (s)	
	无中性导体引出	有中性导体引出
(120~240)	0.8	5
220/380 (230/400)	0.4	0.8
380/660 (400/690)	0.2	0.4
(580~1000)	0.1	0.2

5.3 接地系统的安全要求

5.3.1 基本要求

(1) 系统接地为采用自动切断供电这一间接接触防护措施提供了必要条件。为保证自动切断供电措施可靠有效，要求做到：

1) 当电气装置中发生带电部分与外露可导电部分（或保护导体）之间的故障时，所配置的保护电器能自动切断发生故障部分的供电。

2) 电气装置中的外露可导电部分应通过保护导体 PE 或保护中性导体 PEN 与接地极相连，以保证故障回路的形成。

3) 凡可被人体同时触及的外露可导电部分，应连接到同一接地系统。

(2) 系统中应尽量实施等电位连接。建筑物内的主等电位连接导体应与下列可导电部分互相连接：

1) 主保护导体。

2) 主接地导体。

3) 建筑物内的公用金属管道和类似金属构件（自来水管，煤气管）。

4) 建筑物中的金属部分及集中采暖，空调系统。

(3) 在局部区域，当自动切断供电的条件得不到满足时，应考虑实施辅助等电位连接。辅助等电位连接导体应与区域内的下列可导电部分互相连接：

1) 固定设备的所有能同时触及的外露可导电部分。

2) 保护导体（包括设备的和插座的）。

3) 装置外露的可导电部分（如果不行，还应当包括钢筋混凝土结构中的主钢筋）。

(4) 不得在保护导体回路中设保护电器开关，但允许设置只有用工具才能断开的连接点，严禁用煤气管道做保护导体。

(5) 辅助等电位连接应包括所有可同时触及的固定式设备的外露可导电部分和外部可导电部分。如果可能，还应该包括钢筋混凝土结构中的主钢筋。等电位连接系统应与包括插座的保护导体在内的所有保护导体相连接。如对等电位连接的有效性有怀疑，应证实同时可触及的外露可导电部分和外部可导电部分之间的电阻满足如下条件

$$R \leq \frac{50V}{I_a} \tag{3.1-6}$$

式中： I_a 为保护电器的动作电流。对剩余电流保护继电器来说，是额定剩余动作电流 $I_{\Delta N}$ ，对过电流动作保护器来说为 5s 以内动作的电流。

5.3.2 保护导体截面

5.3.2.1 保护导体截面可按下述的几种方法来确定

(1) 在 GB 7251.1—2005 的标准附录 B 中提出了计算保护导体截面—需长时间承受大约为 0.2~5s 的电流热应力，其截面按式 (3.1-7) 计算

$$S = \frac{\sqrt{I^2 t}}{K} \tag{3.1-7}$$

式中： S 为截面积； I 为在阻抗可忽略的故障时的故障电流（交流有效值）； t 为保护电器的分断供电的时间； K 为取决于保护导体，绝缘和其他部分的材质以及初始温度与最终温度的一个系数。（应考虑到电路阻抗的限流作用和保护器件的限流能力）

系数 K 由式 (3.1-8) 算出。非电缆芯线的绝缘保护导体的 K 值或与电缆外皮接触的裸保护导体的 K 值见表

3.1-8。K 表达式为

$$K = \sqrt{\frac{Q_c(\beta + 20)}{\rho_{20}} \ln\left(1 + \frac{\theta_2 - \theta_1}{\beta - \theta_1}\right)} \quad (3.1-8)$$

式中：Q_c 为导体与材料在 20℃ 时的体积热容量，J/(℃·mm³)；β 为导体在 0℃ 时电阻率温度系数的倒数，℃；ρ₂₀ 为导体材料在 20℃ 时的电阻率，Ω·mm²/m；θ₁ 为导体初始温度，℃；θ₂ 为导体最终温度，℃。

表 3.1-8 系 数 K

裸导体或有绝缘 外套的电缆		聚氯乙烯	裸导体	丁烯橡胶
最终温度 (℃)		160	250	220
导体材料	铜	143	176	166
	铝	95	116	110
	钢	52	64	60

注 导体的初始温度设为 30℃。

β、Q_c、ρ₂₀ 等系数见表 3.1-9。

表 3.1-9 不同材料的计算系数取值

系数 材料	β (℃)	Q _c [J/(℃·mm ³)]	ρ ₂₀ (Ω·mm ² /m)	$\sqrt{\frac{Q_c(\beta+20)}{\rho_{20}}}$
铜	234.5	3.45×10 ⁻³	17.241×10 ⁻⁶	226
铝	228	2.5×10 ⁻³	28.264×10 ⁻⁶	148
铅	230	1.45×10 ⁻³	214×10 ⁻⁶	41
钢	202	3.8×10 ⁻³	138×10 ⁻⁶	78

(2) 保护导体截面积不应小于表 3.1-10 中给出的最小值。

表 3.1-10 保护导体的截面积 (PE、PEN)

相导线的截面积 S (mm ²)	相应保护导体的最小截面积 S _p (PE、PEN) (mm ²)
S≤16	S
16<S≤35	16
35<S≤400	S/2
400<S≤800	200
800<S	S/4

(3) 其他方法。例如通过试验获得。但无论采用何种方法得出的截面积都应保证：

- 1) 有机械保护时截面积不小于 2.5mm²。
- 2) 没有机械保护时截面积不小于 4mm²。

5.3.2.2 保护导体的配置

根据 GB 16895.3 (idt IEC 364-5-54) 《建筑物电气装置—接地配置和保护导体》叙述如下。

- (1) 接地配置。用于保护或功能目的的接地配置可以是合一的或分开的。
- (2) 总接地端子或接地母线与下列导体连接。
 - 1) 接地导体。
 - 2) 保护导体。
 - 3) 总等电位连接导体。

等电位连接导体有总等电位连接导体、辅助等电位连接导体、不接地的等电位连接导体、水表的连接等；总等电位连接导体的截面积应不小于装置的最大保护导体的截面积的一半，但最小应不小于 6mm²。

6 安全防护

6.1 安全技术要求

(1) 一般要求电击防护，电气设备在使用时可采用专门的与电器设备特性和功能无关的安全技术措施。电气设备在按设计使用时遇到特殊环境或运行条件，则在特殊条件下也必须符合 GB 19517 《国家电气设备安全技术规范》要求。

- (2) 电击危险防护。
- (3) 机械危险防护。
- (4) 电气连接和机械连接。
- (5) 运行危险防护。
- (6) 电源控制及其危险防护。
- (7) 标志。

在 GB 19517—2004 要求的规范性附录 A (符合性标准) 中指出，对低压成套开关设备和控制设备系列标准，GB 7251.1、GB 7251.2、GB 7251.3、GB 7251.4、GB 7251.5 和 GB/T 3797 都是其标准的附录，对低压成套开关设备和控制设备总标准来说，就是 GB 7251.1—2005 第 7 章中提到的要求，其他标准的安全要求分别在有关章节中叙述。

6.2 电击防护

电击：电击（触电）为电流通过人体或牲畜的病理生理效应。

当按照有关规定将成套设备安装在一个系统中时，要采取如下的防护措施。根据 GB/T 16895.21 和 GB 7251.1 的要求，这些措施叙述如下。

6.2.1 电击防护的方法、分类

电击防护的方法、分类见表 3.1-11。表中给出了电击防护的分类、安全措施、设备主要特征。

表 3.1-11 电击（防触电）防护分类及对比

类别 项目	0 类	I 类	II 类	III 类
设备主要特征	没有接地保护	有接地保护	有附加绝缘不需接地保护	安全特低电压保护
安全措施	基本绝缘、使用环境 与地绝缘	基本绝缘、接 地线与固定布线 中的保护地线连 接的附加安全预 防措施	基本绝缘、 双重绝缘或加 强绝缘的附加 安全防护措施	安全特低 电压供电

6.2.2 安全超低压防护

安全超低压防护就是利用超低压 (ELV) 的保护。
ELV 为安全电压 (见表 3.1-12)。使用电路工作于安全电压，即使发生触电危险，也不会产生电击。称之为利用 ELV 保护。

表 3.1-12 安 全 电 压 V

状态 国别	1	2	3
IEC	50	25	<12
中国	50	24	
美国	50	25	
日本	50	25	2.5
英国	55(工厂)40(宅)	24	

注 状态 1——干燥的皮肤、高阻抗的地面、人体阻抗 (最大)。
状态 2——潮湿的皮肤、低阻抗的地面、人体阻抗 (小)。
状态 3——浸在水中、人体阻抗 (忽略不计)。

6.2.3 防直接接触(触电)的防护

防直接接触(触电)的防护就是为防止人体与带电部件产生危险接触的一种防护。防护措施如下:

(1) 使带电部件绝缘。是指用绝缘材料将带电体完全包住(如像电缆那样),而通常的漆层、搪瓷或类似物品的绝缘强度不够,不能作为正常使用的触电防护材料。

(2) 可利用成套设备本身适宜的结构措施及安装过程中附加措施获得对直接接触的防护(可要求制造厂给出采取这些措施的资料),如安装了开启式成套开关设备,则应“只有经过批准的人,方能进入”。

(3) 利用挡板或外壳进行防护。利用外壳或挡板防护应遵守下列要求:

1) 所有外壳的直接接触的防护等级至少应为 IP2X 或 IPXXB,金属外壳与被保护的带电部件之间的距离不得小于规定的电气间隙及爬电距离。如果外壳是绝缘的则例外。

2) 所有挡板和外壳均应安全地固定在其位置上。在考虑到它们的特性、尺寸和排列的同时,应使它们有足够的稳固性和耐久性,以承受正常使用时可能出现的变形和应力,而不减少其规定的电气间隙。

3) 在有必要移动挡板,打开外壳或拆卸外壳的部件(如门、护套、覆板和同类物)时,应满足下述条件:

a. 移动、打开或拆卸,必须使用钥匙或工具。

b. 打开门之前,应使所有的带电部件断电,在 TN-C 系统中, PEN 导体不应分离或断开,在 TN-S 系统中,中性导体不必分离或断开。例如将隔离器与一扇门或几扇门连锁,以使它们在隔离器断开时,才能被打开,而且在打开门的同时,隔离器不可能再闭合,除非解除连锁或使用工具。

c. 应给成套设备装设一个内部屏障或活动挡板用来遮挡所有的带电部件,此屏障或活动挡板应符合前述本条 1) 款对挡板要求,例外见本条 2) 款和 3) 的 d 款。

d. 对挡板后面或外壳内部的所有带电部件需要作临时处理时(如更换灯泡或熔芯),只有在挡板后面或外壳内设一屏障(此屏障不必防止有关人员故意用手越过挡板去触及带电部件),以便防止人员意外碰到不带其他保护措施带电部件,或如果带电部件电压为安全超低电压时,方可在不用钥匙或工具,同时也不断开开关的情况下,移动、打开或拆卸挡板或外壳。

(4) 利用屏障。利用屏障进行防护适用于开启式成套开关设备。应能防止身体无意识地接触带电部分及正常操作带电设备时无意识地触及带电部分。

6.2.4 防间接接触(触电)的防护

用户应说明适合于成套设备安装的防护措施。尤其要注意对整个装置防止间接触电的要求,如采用保护导体。

(1) 利用保护电路进行防护:

1) 在结构上采取保证成套装置裸导部件之间以及这些部件和保护电路之间的电连续性。

对 PTTA,除非采用型式试验或不需要进行短路强度验证,否则保护电路应使用单独的保护导体,并且将其安置在母线电磁力影响可被忽略的位置。

2) 成套设备裸露部件在不可能大面积接触或用手抓住,或由于裸露导电部件很小,约 50mm×50mm(如铭牌、铆钉、螺钉等)不会构成危险,则不需要与保护电路连接。

3) 手动操作装置(手柄、转轮)应安全可靠地同已连接到保护电路上的部件进行电气连接,或带有辅助绝缘物,以将手动操作装置同成套设备的其他部件互相绝缘,此绝缘物至少应与手动操作装置的最高绝缘电压等级一样。

4) 用漆层或搪瓷覆盖的金属部件一般认为没有足够的绝缘能力以满足这些要求。

5) 应通过直接的或由保护导体完成的相互有效连接来确保保护电路的连续性。

a. 当把成套设备的一个部分从外壳中取出,例如:进行例行维修,成套设备其余部分的保护电路不应当被切断。

如果采用的措施能够保证保护电路有持久良好的导电能力,而且载流量足以承受成套设备中流过的故障电流,那么,组成成套设备的各种金属部件则被认为能够有效地保证保护电路的连续性(金属软管不能用作保护导体)。

b. 如果可移式或抽出式部件配备有金属支撑表面,而且它们对支撑表面上施加压力足够大,则认为这些支撑表面能充分保证保护电路的连续性。

c. 在门、盖板、遮板或类似部件上面,如果没有安装电气设备,通常的金属螺钉连接和金属铰链连接则被认为足以能够保证保护电路的连续性。

如果在门、盖、板、遮板等部件上装有电压值超过超低电压限值的电器时,应采取措施,以保证电的连续性。通常给这些部件装上一个保护导体(PEN)。为此而设计的如滑动触点、防腐蚀铰链等连接方式也认为是满足要求的。

d. 成套设备内保护电路所有部件的设计,应使它们能够承受在成套设备的安装场地遇到的最大热应力和动应力。

e. 如果将外壳当作保护电路一部分使用时,其导电能力应与表 3.1-10 中规定的最小截面是等效的。

f. 当利用电连接或插头插座切断保护电路连续性时,只有在带电导体已被切断后,保护电路才能断开,并且在重新接通之前,先恢复保护电路连接。

g. 原则上成套设备内部的保护电路不应包含分断器件,但 6) 项中提及的例外。

6) 用于连接外部保护导体的端子和电缆套的端子应是裸露的,如无其他规定,应适用连接铜导体,应该为每条电路的出线保护导体装置一个尺寸合适的单独端子。对铝和铝合金的外壳或导体,应特别注意电腐蚀的危险。在成套设备具有导电结构、外壳等部件的情况下,应当采取措施以保证成套设备的裸导电部件(保护电路)和连接电缆的金属外皮(钢管、铅皮等)之间的电连续性。用于保证裸露导体与外部保护导体电的连续性而采取的连接措施,不得用作其他用途。

7) 外部导体所连接的成套设备内的保护导体(PEN)的截面积应按下述方法中的一种来确定。

a. 保护导体(PEN)的截面积不应小于表 3.1-10 中的值。如果表 3.1-10 用于 PEN 导体,在中性电流不超过相电流的 30%的前提下是允许的。如果用表 3.1-10 得出非标准尺寸,那么采用最接近的较大的标准截面积的保护导体(PEN)。只有在保护导体(PEN)的材料与相导体的材料相同时,表 3.1-10 中的值才有效。

b. 保护导体的截面积还可使用式(3.1-7)来计算求得。

8) 如果成套设备中带有导电材料构成的结构部件、框架、外壳等,保护导体则不需与这些部件绝缘。

9) 接至某些保护电器的导体,包括连接这些器件至单独接地电极的导体都必须进行绝缘。

(2) 采用保护电路以外的措施(有电路的电气隔离和用全绝缘进行防护)进行防护,设备中的保护电路由单独保护导体或导电的结构部件组成,或由两者共同组成,其目的

是提供防止成套设备内部故障及外部电路的故障引起的后果，造成保护电路失效。

6.3 外壳防护

GB 4208《外壳防护等级（IP 代码）》规定了外壳防护

等级 IP 代码级别、划分、定义、试验等。
成套开关设备外壳防护的等级，按不同产品、不同的使用场所要求不同，常用成套设备的外壳防护等级见表 3.1-13。

表 3.1-13 常用成套设备的外壳防护等级				
产品类别	最低要求		目前常用	最高
低压成套开关设备、动力柜（箱）	GB 7251.1	户外：IP33 户内：可选 IP2X、IP3X、IP4X、IP5X	户外：IP43 户内：IP30、IP40	IP65
配电板（照明箱）	GB 7251.3	IP2XC	IP30	IP65
母线槽	GB 7251.2 JB/T 9662 JB/T 8511	IP2X 密集型 IP40 空气型 IP30	IP30、IP40	IP65
建筑工地成套设备（ACS）	GB 7251.4	IP44 开门操作面：IP21	IP44 开门操作面：IP21	IP44 开门操作面：IP23
电缆分线箱（CDCs）	GB 7251.5	IP34D	IP44	IP54
直流开关设备	JB/T 8456	IP20	IP30	IP40
无功功率补偿设备	GB/T 15576	IP2X	IP30	IP30
箱式变电站	GB/T 17467	IP23D	IP34D	IP44
电缆桥架	JB/T 10216	托盘户内：IP30，户外：IP33 耐火户内：IP40，户外：IP44	托盘户内：IP30，户外：IP33 耐火户内：IP40，户外：IP44	

6.4 其他防护问题

6.4.1 其他防护措施

- (1) 保护屏障。保护导体的电气连续性。
- (2) 机械危险防护。电气连接和机械连接，运行危险防护，电源控制及其危险防护。
- (3) 安全标志。

6.4.2 各种保护电器的配合

各种保护电器的配合包括：过电流保护电器间的选择性，剩余电流保护电器与过电流保护电器的组合，剩余电流保护电器之间的选择性。

(1) 过电流保护电器间的选择性。IEC 在考虑中。

(2) 剩余电流保护电器与过电流保护电器的组合。当剩余电流保护电器与过电流保护电器组合时或相合并时，该保护器的组合特性（分断容量，与额定电流有关的动作特性）应满足在周期性负荷情况下，回路的设计电流 I_B 与电缆持续载流量 I_z ，应在 I_B 和 I_z 的热等效恒定负荷基础上进行选择，并应考虑最小、最大短路条件，允许在最大短路条件下、在极限短路分断能力基础上选择保护电器。

(3) 剩余电流保护电器之间的选择性。在发生故障时，特别是涉及安全问题，为能保持无故障部分设备的不间断供电，在发生故障时，特别是涉及安全问题，为能保持无故障部分设备的不间断供电，串联安装的剩余电流保护电器需具有选择性。

(4) 剩余电流保护电器的不动作时间—电流特性曲线位于负载侧（下级）所有剩余电流保护电器的动作时间—电流特性曲线以上。

(5) 电源侧的剩余电流保护电器的额定剩余动作电流应

比位于负载侧的大。

6.4.3 电气连接和机械连接
电气设备必须设置电源连接装置。

6.4.4 机械、运行危险防护
电气设备应具有足够的机械强度，良好的外壳防护及其稳定性。

6.4.5 安全标志
标志是电气设备的组成部分，基本特性、接线、符合标准必须明示，必须使用中文、清晰、持久地标记在产品上。

7 绝缘配合

7.1 绝缘配合

7.1.1 绝缘配合定义
绝缘配合指的是电气设备的绝缘特性，一方面与预期过电压和过电压保护装置的特性有关，另一方面与预期的微观环境和污染防护方式有关。也可以说是根据设备的使用及其周围的环境来选择设备的电气绝缘特性。只有设备的设计基于在其期望寿命中所承受的作用（如电压）强度时才能实现绝缘配合。并考虑预期微观环境和其他影响作用的情况下，电气设备绝缘特性的相互关系。

7.1.2 过电压
用于低压成套配电网中的所有成套开关设备及各类低压电器均会受到偶然产生的过电压。如：

- (1) 大气过电压。
- (2) 操作过电压。
- (3) 故障引起的操作过电压。
- (4) 中压/低压系统中电弧过电压。

7.1.3 绝缘类型 (GB/T16935.1)

- (1) 基本绝缘。设置在带电部分上, 作为防触电基本保护的绝缘。
- (2) 功能绝缘。导体部分之间仅适用于设备特定功能所需要的绝缘。
- (3) 附加绝缘。除基本绝缘外, 另外再设置的独立绝缘, 其目的是为了万一基本绝缘损坏时, 可提供防触电保护。
- (4) 加强绝缘。设置在带电部分上的一种单独的绝缘结构, 主要在有关标准规定的条件下, 提供与双重绝缘相等的防触电等级的绝缘。
- 1) 一个单独的绝缘结构不意味着该绝缘必须是同一质的部件, 它可以有许多层次组成, 而这些层次不能按基本绝缘或附加绝缘单独地进行试验。
- 2) 在母线干线系统 (母线槽) 中, 基本绝缘有时称基础绝缘。附加绝缘有时称辅助绝缘。
- (5) 双重绝缘。由基本绝缘和附加绝缘两者组成的绝缘。

7.2 绝缘配合和电压关系

绝缘配合和电压关系的电压为:

- (1) 在系统中可能出现的电压。
- (2) 设备产生的电压 (该电压可能会反过来影响系统中的其他设备)。
- (3) 人身、财产安全, 使电压强度造成事故的可能性不致导致损害性危险。
- (4) 瞬态过电压 (包括来自系统和自身产生的)。

7.3 绝缘配合和环境关系

在许多情况下, 影响绝缘配合的环境条件有宏观环境与微观环境之分。微观环境是指特别会影响绝缘件爬电距离尺寸的紧密 (直接) 环境。如导电性污染 (水汽、凝露、易腐蚀气体、含碳颗粒)、有可能变成导电的非导电性污染 (易吸收水分的沙砾) 等。

7.4 绝缘电压及其额定值

7.4.1 基本规定

绝缘电压及其额定值是用来确定设备绝缘结构的尺寸, 应规定:

- (1) 基本电压额定值。
- (2) 根据设备用途、安装地点, 规定的过电压类别, 并考虑其与设备连接的系统特性。过电压是指峰值大于运行条件下稳态电压最大值的任一种电压。

7.4.2 过电压类别

过电压类别 (依据 GB 16935.1) 是用于由电源干线供电的设备。分下列四种类别予以考虑:

- (1) 类别Ⅵ适用于在装备进线端使用的设备。
- (2) 类别Ⅲ适用于在固定安装装备中的设备, 例如与工业装备永久连接的开关电器和设备。
- (3) 类别Ⅱ适用于由固定安装装备供电的设备, 例如电器、便携式工具和家用电器。
- (4) 类别Ⅰ适用于连接到一个已经采取措施将瞬时过电压减至低水平电路上的设备。

7.4.3 确定基本绝缘电压

(1) 直接由低压电网供电的设备 (交流或直流系统电压见表 3.1-14 和表 3.1-15), 这一情况是低压网中的多数情况。

表 3.1-14 单相 (三线或两线) 交流或直流系统电压 V

电源系统的标称电压	优选电压	
	线对线绝缘	线对地绝缘
	所有系统	三线中性点接地系统
12.5	12.5	
24 25	25	
30	32	
42 48 50	50	
60	63	
30~60	63	32
100	100	
110 120	125	
150	160	
220	250	
110~120 120~240 300	250 320	125
220~440	500	250
600	630	
480~960	1000	500
1000	1000	

表 3.1-15 三相 (四线或三线) 交流系统电压 V

电源系统的标称电压	优选电压		
	线对线绝缘	线对地绝缘	
	所有系统	三线中性点接地系统	三相三线系统不接地或 (电源) 一线接地
60	63	32	63
110 120 127	125	80	125
150	160		160
208	200	125	200
220 230 240	250	160	250
300	320		320
380 400 415	400	250	400
440	500	250	500
480 500	500	320	500
575	630	400	630
600	630		630
660 690	630	400	630
720 830	800	500	800
960	1000	630	1000
1000	1000		1000

以表 3.1-16 中系统标称电压为依据, 在表 3.1-14 或表 3.1-15 中找到线对线绝缘、线对地绝缘系统的优选电压, 并以此作为选择绝缘构件尺寸 (爬电距离) 的依据。若电气设备中有几个额定电压, 则就有几个标称电压, 这时设备电压应选择其最高额定电压来确定绝缘配合。

表 3.1-16 系统标称电压 V

三 相	单 相
	60
	110, 120
230/400	220, 230
400/690	480
	1000

(2) 非直接由低压电网供电的系统和设备, 这种情况如通信, 工业控制系统等独立系统, 可以参考实际安装在系统中的位置, 选择过电压类别或额定冲击电位水平, 然后找出适当的绝缘与配合。

7.4.4 确定额定冲击电压

设备的额定冲击电压见表 3.1-17, 按相应规定的过电压类别和该设备的额定电压来选取。

表 3.1-17 由低压电网直接供电的设备的额定冲击电压 V						
电源系统的标称电压		从交流或直流 标称电压导出线 对中性点的电压 (不大于)	设备额定冲击电压			
三相	单相		过电压类别			
			I	II	III	IV
230/400 277/480 400/690 1000	120~240	50	330	500	800	1500
		100	500	800	1500	2500
		150	800	1500	2500	4000
		300	1500	2500	4000	6000
		300	1500	2500	4000	6000
		600	2500	4000	6000	8000
1000	1000	4000	6000	8000	12 000	

7.5 绝缘配合与微观环境

微观环境决定绝缘污染的影响, 然而在考虑微观环境时必须注意到宏观环境有效地使用外壳, 封闭式气密封闭等措施可减少绝缘的污染。这些减少污染的措施对设备受凝露或正常运行中其本身产生的污染是有效的。固体微粒、沙尘和水能完全接通小的电气间隙, 因此凡微观环境可存在的污染之处都要规定最小电气间隙。

7.5.1 微观环境下的污染等级

7.5.1.1 污染等级的定义 (见表 3.1-18)

表 3.1-18 污染等级的定义	
污染等级	说 明
1	无污染或只发生干燥非导电污染, 总之污染没有影响
2	通常只发生非导电污染, 但必须预计到在成套装置工作时会有凝露引起暂时性导电
3	要预计到在成套装置工作时会发生导电性污染, 或者由于凝露而使所发生的非导电污染变成导电污染
4	污染会发生持续导电, 例如由导电灰尘或雨雪引起的污染

7.5.1.2 微观环境与承受过电压作用的时间

就爬电距离而言, 电压作用时间会影响干燥事故的时间, 干燥事故能发生表面闪烁, 其能量大的足以引起漏电痕迹, 干燥事故的次数认为足以在以下几个方面引起漏电痕迹:

- (1) 预期持续使用并且内部产生的热量不足以使其干燥的设备。
- (2) 开关电器的输入端和直接由低压电网供电的开关电器供电的进线和负载端 (输入和输出之间的设备内)。
- (3) 承受长期凝露作用和频繁接通, 分断操作下的设备内。

对预期长时间承受持续电压作用的绝缘, 按表 3.1-21 确定其爬电距离。除污染等级 4 外, 承受电压作用的总时间小于或等于15 000h 的绝缘, 可采用相应低一个电压等级的爬电距离。同样承受电压的时间小于或等于 1500h 的绝缘, 可用相应低两个电压等级的爬电距离。放宽电压等级是按持续受压作用的条件确定的。

对于污染等级 2, 表 3.1-21 中规定的绝缘材料组别 I 的爬电距离也可用于所有材料组别。

7.5.2 绝缘材料的相比漏电起痕指数

7.5.2.1 绝缘材料材质

不同的绝缘材料, 承受的绝缘电压的能力不同。材料在污染环境中, 发生漏电起痕的状况不同, 从而影响到它在电场作用下的绝缘特性。这里再进一步说明漏电起痕 (GB/T4207)。选用漏电起痕指数的试验是在人工模拟环境 (用涂敷电解液代替污染物, 用逐步升高试验电压代替实际电场), 测定绝缘材料的可比依据。

7.5.2.2 相比漏电起痕指数 (CTI)

当污染表面, 由于干燥使表面泄漏电流分断时, 其闪烁过程, 集中释放的能量, 使绝缘材料受到损伤。根据其损伤程度, 大致表明绝缘材料的特性。其闪烁作用有如下可能:

- (1) 绝缘材料性能不衰变。
- (2) 放电作用使绝缘材料蚀损 (电腐蚀)。
- (3) 固体绝缘材料表面上电介质污染和电场强度的综合效应, 在其表面上逐渐形成导电通道 (漏电起痕)。

7.5.2.3 绝缘材料的组别

在各种不同的污染和电压下, 绝缘材料的性能是非常复杂的, 经验和试验表明, 具有相对较高性能的绝缘材料的排列与按相比漏电起痕指数 (CTI) 相应等级的排列大致相同。因此采用 CTI 值来进行绝缘材料的分类。

- 绝缘材料按其 CTI 值划分四个组, 称为材料组别:
- 绝缘材料组别 I, $600V \leq CTI$ 。
- 绝缘材料组别 II, $400V \leq CTI < 600V$ 。
- 绝缘材料组别 III, $175V \leq CTI < 400V$ 。
- 绝缘材料组别 IV, $100V \leq CTI < 175V$ 。

7.5.2.4 漏电起痕

漏电起痕是指固体材料表面在电场和电解液联合作用下逐渐形成导电通路的过程。为了对各种材料进行漏电特性的可比性, 还引入相比漏电起痕指数、耐漏电起痕指数两个绝缘材料材质应用判定指标。相比漏电起痕指数是指材料表面能经受住 50 滴电解液而没有形成漏电起痕的最高电压值 (CTI 值)。耐漏电起痕指数是指材料表面能经受住 50 滴电解液没有形成漏电起痕的耐压值 (PTI 值)。

7.6 电气间隙的确定及影响因素

电气间隙是指不同电位的两导电部件间的空间直线距离。它表明在两个导电部件间、对空气的隔离性能。在表 3.1-19 中给出了绝缘配合的最小间隙, 满足绝缘配合的最小间隙就是满足绝缘配合要求的关于尺寸的规定。

表 3.1-19 空气中的最小电气间隙								
额定冲击耐受电压 U_{imp} (kV)	最小电气间隙 (mm)							
	情况 A 非均匀电场条件				情况 B 均匀电场 (理想条件下)			
	污染等级				污染等级			
	I	2	3	4	1	2	3	4
0.33	0.01				0.01			
0.5	0.04	0.2			0.04	0.2		
0.8	0.1		0.8		0.1		0.8	1.6
1.5	0.5	0.5		1.6	0.3	0.3		
2.5	1.5	1.5	1.5		0.6	0.6		
4	3	3	3	3	1.2	1.2	1.2	
6	5.5	5.5	5.5	5.5	2	2	2	2
8	8	8	8	8	3	3	3	3
12	14	14	14	14	4.5	4.5	4.5	4.5

注 最小的电气间隙值以大气压为 80kPa 时 (它相当于海拔 2000m 处的正常大气压) 的 (1.25/50) μs 冲击电压为基准。

7.6.1 电气间隙的确定

电气间隙应以承受所要求的冲击电压来确定, 对于直接

由低压电网供电的设备，其所要求的脉冲耐压为额定冲击电压见表 3.1-22，电气间隙应从表 3.1-19 中选取。

7.6.2 影响因素

功能绝缘的冲击耐受电压按下面有关条款确定。

(1) 电场条件。电场条件分为均匀电场和非均匀电场，电场的均匀性是以导电部件的形状结构尺寸，能否使该处内部电场强度基本上为恒定电压梯度来衡量。在多数情况下，都是选非均匀电场栏内的参数。

(2) 海拔。在表 3.1-21 中的数值都是在海拔 2000m 及以下条件给出，海拔超过 2000m 时由表 3.1-20 中查得的数据进行修正。

7.7 爬电距离的确定及影响因素

7.7.1 爬电距离的确定

爬电距离是指不同电位的两个导电部件之间沿绝缘材料表面的最小距离。爬电距离可从表 3.1-21 中选取。

表 3.1-20 海拔修正系数

海 拔 (m)	正常气压 (kPa)	电气间隙倍增系数
2000	80.0	1.00
3000	70.0	1.14
4000	62.0	1.29
5000	54.0	1.48
6000	47.0	1.70
7000	41.0	1.95
8000	35.5	2.25
9000	30.5	2.62
10 000	26.5	3.02
15 000	12.0	6.67
200 000	5.5	14.50

表 3.1-21 爬电距离的最小值

设备额定绝缘电压 或实际工作电压交流 方均根值或直流 ^⑤ (V)	设备长期承受电压的爬电距离 (mm)														
	污染等级			污染等级				污染等级				污染等级			
	1 ^⑥	2 ^⑥	1	2				3				4			
	材料组别			材料组别				材料组别				材料组别			
	③	④	③	I ^②	II	IIIa	IIIb	I	II	IIIa	IIIb	I	II	IIIa	IIIb
10	0.025	0.04	0.08	0.4	0.4	0.4		1	1	1		1.6	1.6	1.6	
12.5	0.025	0.04	0.09	0.42	0.42	0.42		1.05	1.05	1.05		1.6	1.6	1.6	
16	0.025	0.04	0.1	0.45	0.45	0.45		1.1	1.1	1.1		1.6	1.6	1.6	
20	0.025	0.04	0.11	0.48	0.48	0.48		1.2	1.2	1.2		1.6	1.6	1.6	
25	0.025	0.04	0.125	0.5	0.5	0.5		1.25	1.25	1.25		1.7	1.7	1.7	
32	0.025	0.04	0.14	0.53	0.53	0.53		1.3	1.3	1.3		1.8	1.8	1.8	
40	0.025	0.04	0.16	0.56	0.8	1.1		1.4	1.6	1.8		1.9	2.4	3	
50	0.025	0.04	0.18	0.6	0.85	1.2		1.5	1.7	1.9		2	2.5	3.2	
63	0.04	0.063	0.2	0.63	0.9	1.25		1.6	1.8	2		2.1	2.6	3.4	
80	0.063	0.1	0.22	0.67	0.95	1.3		1.7	1.9	2.1		2.2	2.8	3.6	
100	0.1	0.16	0.25	0.71	1	1.4		1.8	2	2.2		2.4	3.0	3.8	
125	0.16	0.25	0.28	0.75	1.05	1.5		1.9	2.1	2.4		2.5	3.2	4	
160	0.25	0.4	0.32	0.8	1.1	1.6		2	2.2	2.5		3.2	4	5	
200	0.4	0.63	0.42	1	1.4	2		2.5	2.8	3.2		4	5	6.3	
250	0.56	1	0.56	1.25	1.8	2.5		3.2	3.6	4		5	6.3	8	
320	0.75	1.6	0.75	1.6	2.2	3.2	①	4	4.5	5	①	6.3	8	10	①
400	1	2	1	2	2.8	4		5	5.6	6.3		8	10	12.5	
500	1.3	2.5	1.3	2.5	3.6	5		6.3	7.1	8.0		10	12.5	16	
630	1.8	3.2	1.8	3.2	4.5	6.3		8	9	10		12.5	16	20	
800	2.4	4	2.4	4	5.6	8		10	11	12.5		16	20	25	
1000	3.2	5	3.2	5	7.1	10		12.5	14	16		20	25	32	
1250			4.2	6.3	9	12.5		16	18	20		25	32	40	
1600			5.6	8	11	16		20	22	25		32	40	50	
2000			7.5	10	14	20		25	28	32		40	50	63	
2500			10	12.5	18	25		32	36	40		50	63	80	
3200			12.5	16	22	32		40	45	50		63	80	100	
4000			16	20	28	40		50	56	63		80	100	125	
5000			20	25	36	50		63	71	80		100	125	160	
6300			25	32	45	63		80	90	100		125	160	200	
8000			32	40	56	80		100	110	125		160	200	250	
10 000			40	50	71	100		125	140	160		200	250	320	

注 1. 工作电压为 32V 及以下的绝缘不会出现漏电或漏电起痕现象。然而必须考虑到电解腐蚀的可能性，为此规定了最小的爬电距离值。

2. 按照 R10 数系选择电压值。

① 此区域内的爬电距离值尚未确定。材料组别 IIIb 一般不推荐用于 630V 以上的污染等级 3，也不推荐用于污染等级 4。

② 由于 GB/T 16935.1—1997《低压系统内设备的绝缘配合 第 1 部分：原理、要求和试验》中 2.4 条的条件，材料组别 I 或材料组别 II，IIIa，IIIb 漏电起痕的可能性减小。

③ 材料组别 I，II，IIIa，IIIb。

④ 材料组别 I，II，IIIa。

⑤ 作为例外，对于额定绝缘电压 127V，208V，415V，440V，660V/690V 和 830V，可以采用分别对应于 125V，200V，400V，630V 和 800V 的较低挡的爬电距离值。

⑥ 这两栏中给出的值适用于印刷线路材料的爬电距离。

表 3.1-22 海拔 2000m 处的耐受电压

电气间隙 (mm)	情况 A(非均匀电场)		情况 B(均匀电场)		
	交流 (50/60Hz)		冲击 (1.2/50μs)	交流 (50/ 60Hz)	交流 (50/60Hz) 和冲击 (1.2/50μs)
	有效值 (kV)	峰值 (kV)	峰值 (kV)	有效值 (kV)	峰值 (kV)
0.010	0.23	0.33	0.33	0.23	0.33
0.012	0.25	0.35	0.35	0.25	0.35
0.015	0.26	0.37	0.37	0.26	0.37
0.020	0.28	0.40	0.40	0.28	0.40
0.025	0.31	0.44	0.44	0.31	0.44
0.030	0.33	0.47	0.47	0.33	0.47
0.040	0.37	0.52	0.52	0.37	0.52
0.050	0.40	0.56	0.56	0.40	0.56
0.062 5	0.42	0.60+	0.60+	0.42	0.60+
0.080	0.46	0.65	0.65	0.50	0.70
0.10	0.50	0.70	0.81	0.57	0.81
0.12	0.52	0.74	0.91	0.64	0.91
0.15	0.57	0.80	1.04+	0.74	1.04
0.20	0.62	0.88	1.15	0.89	1.26
0.25	0.67	0.95	1.23	1.03	1.45
0.30	0.71	1.01	1.31	1.15	1.62
0.40	0.78	1.11	1.44	1.38	1.95
0.50	0.84	1.19	1.55	1.59	2.25
0.625	0.90	1.27	1.65	1.79	2.53
0.80	0.98	1.39	1.81	2.15	3.04
1.0	1.06	1.50+	1.95	2.47	3.50+
1.2	1.20	1.70	2.20	2.89	4.09
1.5	1.39	1.97	2.56	3.50	4.95
2.0	1.68	2.38	3.09	4.48	6.33
2.5	1.96	2.77	3.60	5.41	7.65
3.0	2.21	3.13	4.07	6.32	8.94
4.0	2.68	3.79	4.93	8.06	11.4
5.0	3.11	4.40	5.72	9.76	13.8
6.25	3.51	4.97	6.46	11.5	16.2
8.0	4.26	6.03	7.84	14.6	20.7
10.0	4.95	7.00+	9.10	17.7	25.0+
12.0	5.78	8.18	10.6	20.9	29.6
15.0	7.00	9.90	12.9	25.7	36.4
20.0	8.98	12.7	16.4	33.5	47.4
25.0	10.8	15.3	19.6	41.2	58.3
30.0	12.7	17.9	23.3	48.8	69.0
40.0	16.2	22.9	29.8	63.6	90.0
50.0	19.6	27.7	36.0	78.5	111.0
60.0	22.8	32.3	42.0	92.6	131.0
80.0	29.2	41.3	53.7	120.9	171.0
100.0	35.4	50.0+	65.0	148.5	210.0

注 为了简化,标以“+”之间的电压值来自考虑 0~2000m 海拔修正系数的双对数坐标图(GB/T 16935.1—1997 的附录 A 的图 A.1)中的直线以取代按表中的统计测量值。从图 A.1 中取得的中间值围绕测量值具有小的安全裕度。表中的交流有效值是从交流峰值除以 $\sqrt{2}$ 后获得的。

表 3.1-23 直接接触防护与绝缘配置实例

绝缘类型	绝 缘 配 置		
	A	B	C
	可触及部分导电并 连接到保护导体上	可触及部分不导电	可触及部分导电但 不连接到保护导体上
1. 固体绝缘或液体绝缘			
2. 全部或局部利用空气间隙绝缘			
3. 相邻电路的绝缘电路 A: 较低电压电路			

7.7.2 影响因素

爬电距离确定时,必须考虑以下因素的影响:电压、微观环境、爬电距离方向和位置、绝缘表面形状、绝缘材料材质、电压作用时间。

7.7.2.1 电压

确定爬电距离,以作用在跨接爬电距离两端的长期电压有效值为基础。此电压为实际工作电压、额定绝缘电压或额定电压。

7.7.2.2 污染

微观污染等级影响因素按 7.5 节及表 3.1-21 考虑。

7.7.2.3 爬电距离方向和位置

必须考虑长期使用的时间的影响,制造厂应指明设备或元件预期使用的方位。

7.7.2.4 绝缘表面形状

固体绝缘表面,应尽可能设置横向的筋和槽,以用来阻断引起污染的连续性的漏电途径。

7.8 利用带电部分绝缘进行保护实例

(1) 本节针对利用对带电部分的几种绝缘配合,实现保护直接接触防护与绝缘配置实例见表 3.1-23,由前所述,除基本绝缘外,还有附加绝缘、加强绝缘、双重绝缘、固体绝缘、液体绝缘等。下面介绍在成套设备中一些绝缘的基本关系与它们如何配置。

(2) 对表 3.1-23 直接接触防护与绝缘配置实例的说明。

1) 作为固体绝缘的一种替代方法是通过距离实现保护,如图中的基本绝缘间隙 L_1 、 L_2 。

2) 绝缘等级(含附加绝缘、加强绝缘、双重绝缘)。

- a. 取决于带电部分或相邻电路的电压等级;
- b. 带电部件与保护导体。

3) 三种直接接触防护与绝缘配置实例。

- a. 可触及导电体,并连接到保护导体上。
- b. 可触及导电体,但不连接到保护导体上。
- c. 可触及不导电体。

续表

绝缘类型	绝 缘 配 置		
	A	B	C
	可触及部分导电并 连接到保护导体上	可触及部分不导电	可触及部分导电但 不连接到保护导体上
电路 C: 较高电压电路			
4. 对外壳内的间隙要求			

注 1. A 是带电部分； L_1 是基本绝缘的间隙；B 是电路 A 的基本绝缘； L_2 是加强绝缘的间隙；Bc 是电路 C 的基本绝缘；M 是导电部分；C 是相邻电路；R 是电路 A 的基本绝缘；D 是电路 A 的双重绝缘；Rc 是电路 C 的基本绝缘；T 是试验试指（GB/T 4208）；Z 是电路 A 的附加绝缘；Zc 是电路 C 的附加绝缘；* 也用于塑料螺钉；无直接接触；I 是小于 B 的绝缘；S 是设备的表面。
2. 在 C 栏中塑料螺丝如同金属螺丝一样对待，因为用户在设备的寿命期间可能用金属螺丝替换。

8 电能质量

8.1 电能质量基本概念

8.1.1 电能质量

电能质量是指供电设备的进线端口的电源与正常稳定的 50Hz 正弦波交流电源相比，在电压和电流上的偏差频繁变化及严重地程度。这些偏差，对用电设备的安全稳定地操作将产生不利影响。对大多数用电设备，在设计时有对供电电源的专门技术要求。一般来说，通常是对电压的方均根值及频率最大和最小值的要求。与工业其他产品不同，电力从发电厂送出去之前是无法评估其质量的。电能是在生产的同时就被应用。电能是从距离很远的地方经过多台变压器，若干公里的传输线，并且还混合了别的发电机的并网电能以及大型电动机回馈电能后送达的。有些用户期望着供电不中断，并在 100% 的时间、任何地点，电源质量的偏差均保持在允许范围内，并给出一个合理的变动范围，国家标准对此有规定的值。

8.1.2 合格的电能质量

- (1) 合格电能质量是指提供给敏感设备的电力和为其设置的接地系统均适合于该设备正常工作。
- (2) 造成用电设备故障或误动作的任何电力问题都是电能质量问题，其表现为电压、电流或频率的偏差。
- (3) 合格的电能质量应当是恒定频率和恒定幅值的正弦波形电压于连续供电。
- (4) 保证用电设备能正常连续工作，频率偏差、电压偏差、电压波动与闪变、三相不平衡、暂时或瞬态过电压、波形畸变、电压暂降与短时间中断等在国家标准规定的范围内。

8.1.3 电能质量分类

8.1.3.1 电能质量的分类

为了系统地分析和研究电能质量现象，并能够对其测量结果进行分选识别，从中找出引起电能质量问题的原因和采取针对性的解决方法，因此将电能质量进行分类和给出相应的定义是很重要的。对于电能质量现象可以根据不同基础来分类。以下介绍了近几年国际上在电能质量现象分类和特性

描述等方面取得的研究成果。其中，在国际电工界有影响的 IEC 以电磁现象及相互干扰的途径和频率特性为基础，引出了广义的电磁扰动的基本现象分类，我们可进一步用其属性和特征加以描述。对于稳态现象，可利用以下属性来描述：幅值、频率、频谱，调制电源阻抗、下降深度、下降面积；对于非稳态现象，还可能需要一些其他特征来描述：上升率、幅值、相位移、持续时间、频谱、频率、发生率、能量强度、电源阻抗等。

电能质量问题还有一种分类方法，即按照电能质量扰动现象的两个重要表现特征变化的连续性和事件的突发性为基础分成两类，这种分类是比较实用的。

(1) 变化型。是指连续出现的电能质量扰动现象，其重要的特征表现为电压或电流的幅值、频率、相位差等在时间轴上的任一时刻总是在发生着小的变化。例如，系统频率不可能一成不变的等于 50Hz（或 60Hz），系统电压也不可能每时每刻恒等于其额定值，与理想值的偏差始终存在。这一类现象包括前述的电压幅值变化、频率变化、电压与电流间相位变化、电压不平衡、电压波动、谐波电压和电流畸变、电压陷波、主网载波信号干扰等。由于电力系统中的电能质量现象多为随机现象，在对变化型电压和电流进行质量评估时，往往采用概率统计方法来处理，即采用概率密度函数给出相应变量在某一确定点的概率值，并且用概率分布函数反映该变量处在某一确定范围内的可能性有多大。

(2) 事件型。是指突然发生的电能质量扰动现象，其重要的特征表现为电压或电流短时严重偏离其额定值或理想波形。这一类现象包括电压暂降和电压短时间中断、欠电压、瞬态过电压、阶梯形电压变化、相位跳变等。在事件型电压和电流评估时，通常采用其特征量，如用幅值偏离量的多少、事件持续时间长短以及发生的频次等来描述，并且用概率论和数理统计方法以及可靠性计算来处理。监测事件型电压和电流时，要求有一个事件起动信号，如电压均方根值低于某一预定的值便开始记录，待事件结束时停止记录。

需要指出的是，迄今为止对电能质量的分类仍存在着由于定义不同引起的类别区分界线不很清晰和由于分类方法不同产生的技术名词不统一等问题。对电能质量现象科学、完

整的分类对我们更加深入地了解 and 认识各种电能质量现象是十分有意义的，仍是未来电能质量标准化尚待深入开发的重要工作。

8.1.3.2 电能质量的特点

电能除了具有其他工业产品的基本特征（如可以对产品的质量指标分级、检测和预估，可以确定相应的质量标准和实施必要的质量控制）之外，由于其产品形式单一，而且其生产、输送与消耗的全过程独具特色，因此在引起电能质量问题的原因上、在劣质电能的影响与评价等方面与一般产品的质量不同，具有以下显著特点：

（1）电力系统的电能质量始终处在动态变化中。电能从发电生产到用户消耗是一个整体，电能量的流动始终处于动态平衡之中，并且随着电网结构的改变和负荷的变化，不同时刻、不同公共连接点，电能质量现象和指标往往是不同的，也就是说整个电力系统的电能质量状态始终处在动态变化中。

（2）电力系统是一个整体，其电能质量状况相互影响。电能不易储存，其生产、输送、分配和转换直至消耗几乎是同时进行的。很显然，在电力系统运行过程中劣质电能是不可能更换的。电气连接将供用电双方构筑成一个整体，不论哪个环节引起电能质量问题，质量一旦达不到标准要求，都会对相关配电网与设备以及电力用户的安全正常运行构成威胁。许多情况下，电力系统中的某一实体往往表现为既是电能质量的破坏者，同时也是劣质电能的受害者。

（3）电能质量扰动的潜在危害与广泛传播。虽然电产品的基本形式简单，但其质量扰动的现象却是多种多样的，事故的诱发条件比较复杂，电能质量下降造成的对电力系统和用电设备的损害有时并不立即显现，其危害与影响具有潜在性。另一方面，由于电力线为扰动提供了最好的传导途径，且传播速度快，电气环境污染波及面大，影响域广，其结果可能会大大降低与其相连接的其他系统或设备的电气性能，甚至使设备遭到损坏，可见劣质电能的危害与影响具有快速传播性。

（4）有些情况下用户是保证电能质量的主体部分。当电网传输电能作用于用电设备时，很有可能会受到来自于用户反作用的影响。因此，在某些质量问题的起因上，电能质量下降更多的是受到使用者的影响，而不在于电力生产者或供应者。例如，用户设备汲取的供电电流大小和电流波形是由用户根据自己的生产需要设定的，而这些设备往往就是畸变电流的发生源。在这种情况下，电力用户成为保证电能质量的主体部分。

（5）对电力系统的电能质量指标进行综合评估非常困难。一般而言，电力系统在运行过程中电能质量的各项指标接近系统标称值，就可以认为电能是达到标准要求的。但是当电能质量的多个指标共同作用在一个系统中时，其不同的组合结果对电力系统运行的不利影响和对电气设备性能的降低，甚至损坏都是十分复杂的问题，加之不同电器设备在不同条件下对电压干扰的敏感度不同。因此如何给出综合的技术与经济评价仍然是非常困难的，目前尚无一个准确的和普遍认可的定量综合评估计算方法。

8.2 电能质量与电力网中的电磁现象

8.2.1 电力系统组成与特点

电力系统一般是由原动机、发电机、升压变压器、输电线、降压变压器、配电降压变压器（再次降压）、低压成套开关设备，按用户的次序将电能传输到用户设备上。其中经过的设备、系统称为电力设备（系统），从配电降压变压器

直到用户的部分称为低压配电电力网，其所用的设备统称为低压电力设备（系统）。

8.2.2 电力系统的电磁现象

低压电力系统中，由于用电设备的接入，使得电力系统发生若干不利于电网运行及对用电设备造成危害的电磁现象。这些现象是电压暂降、电源中断、电压暂升、瞬时变化、谐波、缺口、电压波动、频率偏差等。

8.2.2.1 电磁现象的种类和特征

电磁现象的种类和特征，见表 3.1-24。

表 3.1-24 电力系统中电磁现象的种类和特征

种 类		典型谐波成分	典型持续时间	典型电压幅值 (p. u.)
电磁瞬态冲击	ns 级	5ns	<50ns	
	μs 级	1μs	50ns~1ms	
	ms 级	0.1ms	>1ms	
电磁瞬态冲击	低频	<5kHz	0.3~50ms	0~4
	中频	5~500kHz	20μs	0~4
	高频	0.5~5MHz	5μs	0~4
瞬时电压变动	中断 暂降 升高		0.5~30 周	0.1
			0.5~30 周	0.1~0.9
			0.5~30 周	1.1~1.5
瞬时电压变动	中断 暂降 升高		30 周至 1min	0.1
			30 周至 1min	0.1~0.9
			30 周至 1min	1.1~1.4
短时电压波动	中断 暂降 升高		3ms~1min	0.1
			3ms~1min	0.1~0.9
			3ms~1min	1.1~1.2
长时电压波动	持续中断 欠电压 过电压		1min	0.0
			1min	0.8~0.9
			1min	1.1~1.2

（1）电源中断、暂降。电压暂降是种随机现象，跌落约 10%~90%、持续时间 0.5ms，在一个地区每年发生几十至一千次，短时中断（断电）每年发生几十至百次，约 70%的短时断电时间不超过 1s。而若时间超过 3min，则属长期断电。

（2）电压暂升和瞬时变化。电压暂升属于过电压，它包括工频过电压、操作过电压、谐振过电压、雷击过电压及线路分闸过电压、补偿电路断开过电压等，低压系统暂时工频过电压一般不超过 1.5 倍相电压，大部分持续时间小于 1s。瞬态过电压，低压系统一般不超过 6kV，时间很短。

（3）缺口。缺口是由于变流器整流线路（换相瞬间引起相间短路，产生在馈电线路上的特殊现象）。例一常用可控三相桥整流器，由 6 只电力电子开关，依次换相导通。当电流由一个开关转移到另一排的另一个开关（分上排三个、下排三个）称换相。在换相时，同一排的元件中 2 个（或 3 个）开关同时导通，使相间瞬间短路，在桥的输入端线电压瞬时减到零，出现线电压缺口。在电流极限工作时产生换相缺口最大，若变流器不用去耦元件连接到电网上，则缺口的短路可能是彻底的短路（达 100%深度）。

（4）电压波动和闪变。供电电源的电压发生短时间（10min 以内）的闪变值或叫瞬时停电，称电压闪变，如长时间闪变（达数小时）称为电压波动。它是由雷击、电源倒闸、大功率设备起动引起的电源短时故障，电压波动和闪变见表 3.1-25。

表 3.1-25 电压波动和闪变

电压不平衡			稳态	0.5%~2%
波形失真	直流偏移		稳态	0~0.1%
			稳态	0~20%
	谐波	0~6kHz	稳态	0~2%
	噪声	宽带	稳态	0~1%
电压波动		15ms~10min<25Hz	瞬态 断续	30%~100% 0.1%~7%
频率偏差		0.2~0.5Hz	10s	0.5%

(5) 供电电压偏差。供电电压偏差不像上面提到的电磁现象大都是瞬态现象，而是一种稳态变化。供电电压偏差以标称值的百分数表示，如1.5%，2%，7%，10%等。它和供电电压的电压等级有关。如LV（低压），MV（中压），HV（高压）。

(6) 谐波。谐波是指发生在电源频率的数倍频的叠加波，它叠加在工频波上，引起电压波形畸变。此外还有谐波，它是非整数倍的谐波，同样会叠加在工频波上，引起电压波形畸变。

(7) 频率波动。允许限值：正常允许±0.2Hz，根据系统容量可放宽到±0.5Hz，用户冲击引起的波动一般不超过±0.2Hz。

8.2.2.2 影响电能质量的因素

影响电能质量的因素有空间电磁辐射、雷电、接地故障、“地”电位不平衡、地区电网中设备产生的扰动等。

8.3 交流电能质量的指标及国家标准

衡量交流电能质量的指标有：供电频率允许偏差、供电电压允许偏差、供电电压波动和闪变、供电三相电压允许不平衡度及电网谐波允许指标。

表 3.1-27 谐波电流允许值

标准 电压 (kV)	基准短 路容量 (MVA)	谐波次数及谐波电流允许值 (A)																							
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24	11	12	9.7	18	8.6	16	7.8	8.9	7.1	14	6.5	12
6	100	43	34	21	34	14	24	11	11	8.5	16	7.1	13	6.1	6.8	5.3	10	4.7	9.0	4.3	4.9	3.9	7.4	3.6	6.8
10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9	3.7	4.1	3.2	6.0	2.8	5.4	2.6	2.9	2.3	4.5	2.1	4.1
35	250	15	12	7.7	12	5.1	8.8	3.8	4.1	3.1	5.6	2.6	4.7	2.2	2.5	1.9	3.6	1.7	3.2	1.5	1.8	1.4	2.7	1.3	2.5
66	500	16	13	8.1	13	5.4	9.3	4.1	4.3	3.3	5.9	2.7	5.0	2.3	2.6	2.0	3.8	1.8	3.4	1.6	1.9	1.5	2.8	1.4	2.6
110	750	12	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8	3.0	3.2	2.4	4.3	2.0	3.7	1.7	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5	1.2	1.4	1.1	2.1	1.0	1.9

当电网公共连接点的最小短路容量不同于表 3.1-27 中基准短路容量时，按式（3.1-9）修正换算表 3.1-27 中的谐波电流允许值

$$I_h = \frac{S_{k1}}{S_{k2}} I_{hp} \tag{3.1-9}$$

式中：S_{k1}为公共连接点的最小短路容量；S_{k2}为基准短路容量；I_{hp}为表 3.1-27 中的第 h 次谐波电流允许值；I_h为短路容量为 S_{k1}时的第 h 次谐波电流允许值。

8.3.3 电能质量—电力系统频率允许偏差

GB/T 14545 规定频率允许偏差：

(1) 电力系统正常频率偏差允许值为±0.2Hz，当系统容量较小时，偏差值可放宽到±0.5Hz。

(2) 用户冲击负荷引起的系统频率变动一般不超过±0.2Hz。

8.3.4 电能质量—暂时过电压和瞬态过电压

电能质量—暂时过电压和瞬态过电压允许限值见表

电能质量应符合的国家标准：GB/T 12325《电能质量—供电电压允许偏差》；GB/T 12326《电能质量—电压允许波动和闪变》；GB/T 12481《电能质量—暂时过电压和瞬态过电压》；GB/T 14545《电能质量—电力系统频率允许偏差》；GB/T 14549《电能质量—公用电网谐波》；GB/T 15543《电能质量—三相电压允许不平衡度》。

8.3.1 电能质量—供电电压允许偏差

GB/T 12325 规定供电电压允许偏差：

35kV 及以上的正负偏差绝对值之和不超过额定电压的 10%。

10kV 以下三相供电电压允许偏差为额定电压的±7%。

220V 单相供电电压允许偏差为额定电压的+7%、-10%。

8.3.2 电能质量—公用电网谐波允许限值

GB/T 14549 规定公用电网谐波电压（相电压）限值，见表 3.1-26。

表 3.1-26 公用电网谐波电压（相电压）限值

电网标称电压 (kV)	电压总谐波畸变率 (%)	各次谐波电压含有率 (%)	
		奇 次	偶 次
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.6
10			
35	3.0	2.4	1.2
66			
110	2.0	1.6	0.8

GB/T 14549 规定用户接入公用电网（公共连接点）的全部用户向该点注入的谐波电流分量（方均根值）的允许值，见表 3.1-27。

3.1-28。

表 3.1-28 电能质量—暂时过电压和瞬态过电压允许限值

电压等级 (kV)	过电压限值 (p. u.)
$U_m > 252$ (I)	1.3
$U_m > 252$ (II)	1.4
110 及 220	1.3
35~66	$\sqrt{3}$
3~10	$1/\sqrt{3}$

注 1. U_m 指工频峰值电压。
2. $U_m > 252$ (I) 和 $U_m > 252$ (II) 分别指断路器变电站侧和线路侧。

8.3.5 电能质量—三相电压允许不平衡度

GB/T 15543 规定正常电压不平衡度允许值不超过 2%，短时不超过 4%，接入公共连接点的每个用户，引起该点正

常电压不平衡度允许值一般不超过 1.3%。

8.4 电能质量的补偿

由于技术的发展,用电设备的需求,电能质量的补偿已由单项物理指标补偿(如无功功率、谐波、电压波动与中断等),提升为综合考虑“电能质量补偿”的新概念,是对用户产生的无功、谐波进行补偿。最新研究成果表明,除去“电源中断”必须用不停电电源 UPS 外,其他质量缺陷均可纳入电能补偿的范围。从电能质量角度,统一看待各类电能(电压质量和电流质量)质量的缺陷。这样可充分利用现代电力电子技术、微电子技术、自动化技术、信息技术、网络技术补偿的新理论,应用软、硬件等高新技术手段,大大改善和提高低压电力网最终的补偿效果,向用户提供技术新颖、质量优良、能耗低、管理网络化的性价比高的电能质量补偿新装备。

由于大量非线性负载造成的谐波污染,不仅降低电能的生产、传输和利用的效率,而且给供用电设备的正常运行带来严重的危害。谐波抑制是提高电能质量,保证供用电设备安全可靠运行的重要手段之一。减小谐波影响的技术措施可以从两方面入手:一是从谐波源出发,减少谐波的产生;二是安装抑制谐波装置(见本篇第 12 章)。

9 低压电源系统的雷击脉冲保护

9.1 雷电及雷暴分布

9.1.1 雷电

雷电是一种自然现象,它除了危害人身安全外,还会对建筑物、电气设备,特别是对电子、微电子设备产生巨大破坏作用。雷电发生是伴随产生雷电次效应,即当雷电流迅速变化,在其周围空间产生瞬变的强电场和强磁场,使附近的导体上感应很高的电动势。感应电动势传到信息系统产生的破坏性冲击电压或电流。侵入电源系统信息设备(敏感设备),天线系统造成相应的雷击电效应、热效应和机械效应,引起了火灾和人身伤亡等灾害。进入信息系统会导致元件劣化和损害、功能异常,严重时造成设备完全破坏。因此建筑及电气设备都应考虑雷电磁脉冲的防护。

我国的雷电灾害活动频繁,雷电落在线路上称“直击雷”,落在输配电线路附近、耦合到输配电线路上称“感应雷”。从而在线路上形成瞬态过电压,沿线路侵袭,并危及电气设备安全(见图 3.1-5)。

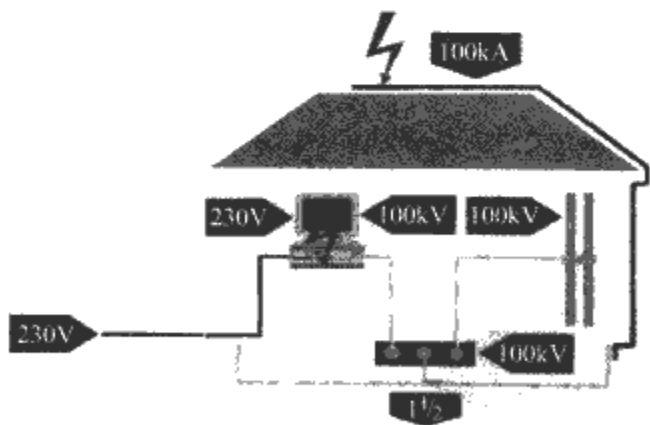


图 3.1-5 雷击击中建筑物引起的电压情况

9.1.2 雷暴分布

我国南北跨 30 多个纬度,处在北温带和亚热带,属雷电多发区。雷暴日是指一年之内听到雷声的天数。例如西北大部分地区雷暴日为 20 天,属少雷区;东北是 30 天;华北和华中是 40~50 天;长江以南至北纬 23°为 40~80 天,属

中雷区;北纬 23°以南包括广东、广西、福建、台湾,在 80 天以上,属严重区。

9.2 雷击防护标准、术语和定义

9.2.1 雷击防护规范与标准

除工业建筑和设备外,民用建筑楼宇智能系统、智能电器、住宅网络系统日益增多,低压开关设备和控制设备设计时,也要考虑雷击防护。

有关雷击电磁脉冲防护的国际标准、国家标准:GB 50057《建筑物防雷设计规范》;GB 50054《低压配电设计规范》;IEC 61312-1《雷击电磁脉冲的防护通则》;IEC 61312-2《雷击电磁脉冲的防护建筑物的屏蔽内部等电位连接与接地》;IEC 61312-3《雷击电磁脉冲的防护对电涌保护器的要求》;IEC 61312-4《雷击电磁脉冲的防护现有建筑物内设备的防护》;IEC 81/165/CD《雷击电磁脉冲的防护应用指南》。

9.2.2 术语和定义

9.2.2.1 直击雷

雷电直接击在建筑物、大地、防雷装置或其他物体上产生电效应、热效应和机械力效应。

9.2.2.2 雷电感应

雷击放电时在附近导体上产生的静电感应和电磁感应。

9.2.2.3 积雨云静电感应

由于积雨云的作用使附近导体上感应出与雷云符号相反的电荷,雷云主放电时先导通道中的电荷迅速中和,在这些导体上的感应电荷得到释放,如不就近泄入地中就会产生很高的电位。

9.2.2.4 雷电磁感应

由于雷电流迅速变化在其周围空间产生瞬变的强电磁场,使附近导体上感应出很高的电动势。

9.2.2.5 雷击电磁脉冲

由雷击放电产生的电磁辐射所形成的强电场和磁场感应到信息系统中,从而产生破坏性的冲击电流或电压。

9.2.2.6 雷电波侵

由于雷电对导电路或金属管道的作用,使雷电波沿着这些管线侵入屋内,危及人身安全或损坏设备。

9.2.2.7 雷电防护系统

由外部防雷装置和内部防雷装置组成防雷设施。

9.2.2.8 外部防雷系统

由接闪器、引下线和接地装置组成,主要用以防护直击雷的防雷装置。

9.2.2.9 内部防雷系统

除外部防雷装置外,所有其他附加设施均为内部防雷装置,主要用来减小和防护雷电流在需防护空间内所产生的电磁效应。

9.2.2.10 雷电防护区 (Lightning Protection Zone, LPZ)

根据被保护设备所在位置、所能耐受的电磁场强度及要求采取相应的防护措施而划分的防护区域。

9.2.2.11 电涌保护器 (Surge Protective Device, SPD)

具有非线性特点的,用以限制瞬态过电压和泄放电涌电流的一种防护器件。

9.2.2.12 电压开关型 SPD

开关型 SPD 在无电涌出现时呈高阻值,当电涌出现且冲击电压达到一定值(点火电压)时,其电阻突然下降变为低值。通常采用放电间隙、充气放电管、闸流管和三端双向晶闸管元件作为开关型 SPD 的组件。

9.2.2.13 限压型 SPD

限压型 SPD 在无电涌出现时呈高阻值,随着电涌电流和冲击电压增加到某值时,其电阻突变为低值。通常采用压敏电阻抑制二极管作为限压型 SPD 的组件。

9.2.2.14 多级集成 SPD (Integrated MultiSPD, IMP)

多级集成 SPD 将多种防护器件集成于一体电涌经过逐级分流、衰减、延时最终电涌过电压以半导体的响应速度被嵌位于预定的安全范围之内。

9.2.2.15 电磁屏蔽

用金属材料减少交变电磁场向指定区域穿透的屏蔽。

9.2.2.16 等电位连接

为达到等电位,将导电部分作电气连接的措施。

9.2.2.17 等电位连接网络

为导电部分之间满足等电位而设的相互连接的网络。

9.2.2.18 共用接地系统

将信息系统设备的直流工作接地、交流工作接地、保护接地、防雷接地等接地共用一组接地装置的接地系统称为共用接地系统(或联合接地系统)。

9.2.2.19 接地基准点

共用接地系统与某一系统的接地或等电位连接网络之间唯一的那一连接点。

9.2.2.20 保护接地

为了安全将某一系统或装置、设备的一点或多点接地。

9.2.2.21 防雷接地

外部、内部防雷装置都必须与接地装置相连,以将雷电流引入大地,这种接地称为防雷接地。

9.2.2.22 防静电接地

为防止静电对电气、信息系统的危险作用而设的接地。

9.3 雷击防护原则及防护系统

9.3.1 雷击防护原则

(1) 雷击电磁脉冲的防护,既要信息系统设备进行防护,更要重视对人身安全进行防护。

1) 人员不得工作在 LPZOA 区,远离跨步电压危险区。

2) 外部防雷装置的引下线位置与人员路过通道和出入口的距离不应小于 3m,以防止发生人员伤害。

3) 外部防雷装置明敷的引下线尽量远离建筑物开放窗口。

4) 孤立的通信站、导航站、雷达站等建筑物内,所有的电气、信息系统都应在进入建筑物的各端口安装电涌保护器。

5) 操作人员可能会接触的信息系统金属外壳应就近做好保护性接地。

6) 当有雷暴时,人员应远离建筑物内设置的空载电源插座、空载信号线、空载天馈线接插件。

(2) 在进行雷击电磁脉冲防护设计时,应认真调查地理、地质、气象等环境条件,雷电活动规律,雷击事故受损原因,信息系统的特点及重要性,发生雷击后果的严重程度等因素,根据工程具体情况分别采用相应的防护措施。

(3) 雷击电磁脉冲防护应采用综合防护措施,使防护最优化。

(4) 雷击电磁脉冲防护应坚持全面规划、多重保护的原则进行设计、施工及维护。

(5) 防雷系统应符合现行的国家有关标准。

9.3.2 雷击电磁脉冲防护系统

雷击电磁脉冲防护系统如图 3.1-6 所示。

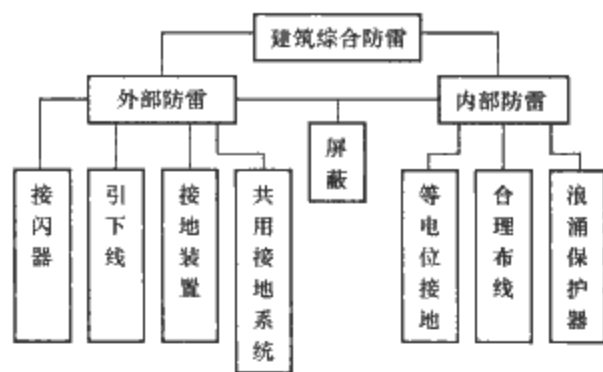


图 3.1-6 雷击电磁脉冲防护系统图

9.4 雷电防护区划分

9.4.1 雷电防护区划分原则

根据雷击时电磁场分布把信息系统所在的建筑物按需要保护的空间,由外向内分为不同的雷电防护区(LPZ),以确定各 LPZ 空间的雷击脉冲强度,然后采取相应的防护措施。

9.4.2 雷电防护区(LPZ)

9.4.2.1 直击雷非防护区(LPZOA)

LPZOA 区内各类物体完全暴露在外部的防雷装置的保护范围外,都可能遭到雷击,本区电磁场未得到任何屏蔽衰减,属完全暴露的不设防区。

9.4.2.2 直击雷防护区(LPZOB)

LPZOB 区内各类物体在外部的防雷装置的保护范围之内,很少遭到大于所选滚球半径的直接雷击,但本区内电磁场未得到任何屏蔽衰减,属充分暴露的直击雷防护区。

9.4.2.3 第一屏蔽防护区(LPZ1)

LPZ1 区内各类物体不可能遭到直接雷击,流经各类导体的雷电流已经分流,雷电流比 LPZOA 区进一步减小;且由于屏蔽措施,本区电磁场强度也已得到了初步的衰减。

9.4.2.4 后续屏蔽防护区(LPZ2~n)

LPZ2~n 区是为进一步减少传导电流或电磁场而增设的后续防护区。

9.5 雷电防护等级划分

9.5.1 雷击电磁脉冲防护等级划分

雷击电磁脉冲的防护应视所在地区雷暴等级,环境因素,信息系统所在建筑物的结构,建筑物的材料,设备放置在哪一个雷电防护区,被防护的信息系统设备的特性、重要性,发生雷击事故的概率以及后果的严重程度等因素。对信息系统雷击电磁脉冲防护等级进行综合评估。将信息系统的防护等级定为 A、B、C、D 四级,分别采取不同的防护措施。

9.5.2 雷击电磁脉冲防护等级的确定

雷击电磁脉冲防护等级可按式(3.1-10)估算

$$E = 1 - N_c / N \quad (3.1-10)$$

式中: N 为建筑物年预计雷击次数; N_c 为因直击雷和雷击电磁脉冲引起信息系统设备损坏的可接受的最大年平均次数。

N 、 N_c 的计算式及分区的信息系统说明见 GB 50057。

防护等级划分指标数据:

$E > 0.98$ 定为 A 级。

$0.90 < E \leq 0.98$ 定为 B 级。

$0.80 < E \leq 0.90$ 定为 C 级。

$E \leq 0.80$ 定为 D 级。

9.6 雷击脉冲的防护措施

9.6.1 屏蔽措施和电缆敷设

屏蔽是减少信息系统设备电磁干扰的基本技术措施。为减少感应效应，宜采取以下措施：

- (1) 外部屏蔽。
- (2) 合理线路敷设。
- (3) 线路屏蔽。
- (4) 建筑物或房间的屏蔽是由金属物、金属框架或钢筋混凝土柱等构件组成，可减少、衰减空间磁场强度，为改进信息系统设备电磁环境，所有与建筑物组合在一起的各种非带电金属件（如屋顶金属表面、立面金属表面、混凝土内钢筋、金属门窗框架、金属设备外壳、金属管线等）都应等电位装置连接在一起，并与接地装置相连。
- (5) 信息系统设备安装位置应远离建筑物引下线的结构柱，变电室、电梯间距离外墙不宜小于 2m。
- (6) 综合布线系统的设备间及不同雷电防护区的布线交接间内应设置等电位专用的接地端子排。

9.6.2 等电位连接和共同接地

- (1) 为保证建筑物内信息系统的正常工作，以及信息系统不被雷击电磁脉冲损坏和保障操作人员的人身安全，所有的电气、信息系统设备均应采用等电位连接、保护接地和各种功能性接地。
- (2) 信息系统的保护接地及各种功能性接地应采用共用接地系统，共用接地系统接地装置的接地电阻应满足各系统中最小接地电阻值的要求。建筑物应做总等电位连接，局部作辅助等电位连接。当有特殊要求时也可采用独立接地。
- (3) 将分开的电气装置外露可导电部分应用等电位连接导体或电涌保护器（SPD）连接，以减少信息系统设备所在建筑物金属物件与设备之间或设备与设备之间因雷击电磁脉冲产生的电位差。用钢筋混凝土结构中的钢筋及金属构件的多重连接建立一个三维网络实现等电位连接。
- (4) 建筑物的各类水管、采暖管和空调管等金属管道和电缆的金属外护层、PE 线、PEN 线和接地干线等在进入建筑物处应做等电位连接，燃气管道应在入户处加装绝缘法兰或绝缘段，并在绝缘法兰或绝缘段两端应用 SPD 连接，其户内侧金属管道应做等电位连接。
- (5) 在配置有信息系统设备的机房内应设等电位连接网络，电气和信息设备的金属外壳和机柜、机架、计算机直流接地、静电接地、金属屏蔽线缆外层、电源保护接地及各种 SPD 接地端均应以最短的距离就近与这个等电位连接网络直接连接。
- (6) 连接网络的基本结构型式有星型（S）结构或网型（M）结构。较小的信息系统宜采用 S 型结构，当采用 S 型时，信息系统的所有金属构件除在接地基准点（ERP）处连接外，均应与共接地系统的各组件有足够的绝缘（大于 10kV，1.2/50μs）。较大的信息系统和开环信息系统宜采用 M 型结构，信息系统的所有金属组件不应与共用接地系统绝缘，应通过多点连接方法接到共用接地系统中。在复杂的信息系统中，可以将 S 型结构和 M 型结构组合在一起。
- (7) 实现等电位连接的导体，其材料及最小截面要求见表 3.1-29，用铜或镀锌扁钢（在腐蚀性较强的环境中，应采用热镀锌等防腐措施）做等电位连接带。
- (8) 在各雷电防护区界面应做等电位连接，被保护的设备安装的位置在界面附近，应将电涌保护器安装在被保护设备处，而线路的金属保护层或屏蔽层宜首先与界面处做一次

等电位连接。

(9) 优先利用建筑物的基础钢筋作为共用接地系统。如建筑物没有基础钢筋地网，应在建筑物四周埋设（距基础 1m 处）人工垂直接地体和水平环形接地体。共用接地系统的电阻应按信息系统设备中要求的最小值确定。

表 3.1-29 等电位连接的导体材料及最小截面要求 mm²

材 料	不同部位截面	
	总等电位连接处 (LPZ0B 与 LPZ1 交界处)	局部等电位连接处 (LPZ1 与 LPZ2 交界处及 以下交界处)
铜材	16	6
铝材	25	10
钢材	50	16

9.6.3 电涌保护器

9.6.3.1 电涌保护器的作用

将信息系统中不能使用导体进行等电位连接的带电体，如电源线、信号线等使用电涌保护器与接地系统连接，利用电涌保护器的非线性特性限制瞬时过电压和分走电涌电流，达到保护设备的目的。

雷击浪涌保护接线的原理见图 3.1-7，其立足能量观点，协调使用保护器。它包括避雷器、去耦电抗器、过压保护器三部分。

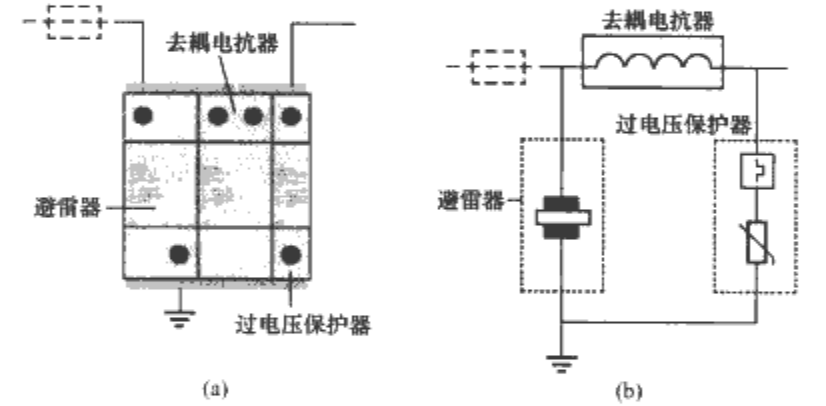


图 3.1-7 防雷击的浪涌保护器
(a) 外观图；(b) 电路图

9.6.3.2 电涌保护器的选择

- (1) 配电系统应根据信息系统的防护等级采用不同的防护措施：
 - 1) A 级采用 4 级 SPD 进行保护，最后一级采用多级集成 SPD。
 - 2) B 级采用 3 级 SPD 进行保护，最后一级采用多级集成 SPD。
 - 3) C 级采用 2 级 SPD 进行保护。
 - 4) D 级采用 1~2 级 SPD 进行保护。
- (2) 信息系统在 LPZ0B 区内，以雷击电磁脉冲防护为主。
- (3) 信息系统各防护等级供电系统的第一级（进线级）选用大通流量的限压型 SPD，安装在 LPZ0B 与 LPZ1 区界面处。第二，第三级 SPD 选用限压型，安装在相应的防雷区界面处。末级 SPD 选用多级集成 SPD（IMP），贴近设备安装。
- (4) 电源系统各级 SPD 选用取决于 SPD 之间、SPD 与被保护设备之间的能量配合。各级限压型 SPD 之间的安装距离不宜小于 5m，否则应在其间加退耦器件。电源 SPD 的技术性能要求见表 3.1-30。

(5) 电源 SPD 自保护要求：

- 1) SPD 劣化时有热脱扣保护装置。
- 2) SPD 外封装材料应为阻燃材料。

3) 重要建筑物的配电系统宜选用有备份功能的 SPD，重要机房选用多级集成型 SPD (IMP)。

4) SPD 要有可维护性。

(6) SPD 类型说明 (见表 3.1-31)。

1) 总配电防雷一级保护，串联熔断器 RT18/50A，要求模块为大容量限压型产品，响应时间为 25ns，例如：SPD100T，SPD 劣化后，其电阻可能降低造成短路，串联熔断器对这种情况提供保护。不推荐使用空气间隙放电类产品，不仅因为其响应速度慢 (100ns)，而且在较强雷电涌冲击下，空气间隙放电类产品会产生强大电弧，可能破坏其他电气设备，并可能引发火灾。要求产品具有远程报警或集中监控端子。

2) 楼层配电盘宜选防雷二级保护，串联熔断器 RT18/32A，要求模块为限压型产品，并具有热备份功能，当芯片

劣化脱离后，备份芯片自动投入运行，有效避免 SPD 失效后，后续雷电电涌的破坏，例如：SPD40TA。较高或重要楼层的配电盘和其他雷击风险较高的配电盘，应考虑采用要求具有远程报警或集中监控端子。

3) 设备末端防雷保护是对电源线路电涌的第三级保护。例如：SPD20S 或 SPD3S。要求具有 3kA 的防雷能力。与普通暗装插座大小相同，安装使用方法相似。可以替代普通暗装插座。

4) 计算机中心机房、消防中心、监控机房、电信机房、手术室和其他重要用电设备的房间，应使用多级集成型 SPD (IMP)。这是因为雷电能量可能通过窗口、引下线、侧击雷、地电位环路等复杂方式绕过前两级 SPD 直接进入机房。IMP 内含三级保护，并具有半导体级的响应速度。可以较好地保护重要设备，例如：IMP2030T (S)、IMP2050T、IMP2080T。

5) 对室外用电设备，由于处于 LPZ0-LPZ1 界面，应选用大容量限压型电涌保护器，例如：SPD100T (S)。

表 3.1-30 电源 SPD 的技术性能要求

SPD性能要求 防雷等级	应采用 保护级数	第一级通流容量 (kA)			第二级通流容量 (kA) 8/20μs	第三级通流容量 (kA) 8/20μs	第四级通流容量 (kA) 8/20μs
		架空进线		埋地进线 8/20μs			
		8/20μs	10/350μs ^①				
A 级	4 级	≥100	≥15	≥80	≥40	>10	≥3~5
B 级	3 级	≥100	≥15	≥60	≥40	>10	≥3~5
C 级	2 级	≥80	≥10	≥40	≥20		
D 级	1~2 级	≥80	≥10	≥40	≥20		

① 在无直击雷防护措施且采取架空进线时，在 LPZ0A 与 LPZ1 界面处，也可以选用开关型 SPD。但要注意选用具有灭弧功能的开关型 SPD。

表 3.1-31 SPD 类型说明

SPD类型 主要参数	SPD100T	SPD100S	SPD40T	SPD40TA	SPD20S	SPD3S	IMP2030T	IMP2050T	IMP2080T	IMP2030S
通流能力 (kA) (8/20μs)	100	100	40	40×2	20	3	20	20	20	20
响应速度 (ns)	25	25	25	25	25	25	10	10	10	10
额定电压 (V)	三相 380V	单相 220V	三相 380V	三相 380V	单相 220V	单相 220V	三相 380V	三相 380V	三相 380V	三相 380V
限制电压 (V)	1.2k	1.2k	1.2k	1.2k	1.2k	1.2k	780	780	780	780
额定负载 (A)	无	无	无	无	无	无	50	50	50	50

第2章 低压成套设备

1 概述

本章主要介绍典型低压成套开关设备和控制设备,对各类典型产品所具有的特点、技术要求、基本结构进行介绍。有关低压成套开关设备和控制设备的共性技术要求及结构要求在本卷的第一篇和本篇的第1章概述中。

典型产品:固定面板式成套开关设备,柜式封闭式成套开关设备,抽出式成套开关设备,抽出、分割混合式成套开关设备,箱组式成套开关设备,低压固定分隔柜,密封式成套开关设备,柜组式成套开关设备等。

这里的常用低压成套开关设备产品不包括动力柜、照明箱、母线槽、箱式变电站及各类补偿,仅指具有进线和配电功能的低压成套开关设备,其他见分章说明。

2 固定面板式成套开关设备和控制设备

固定面板式成套开关设备和控制设备有两类开启式成套开关设备和控制设备、固定面板式成套开关设备和控制设备。

2.1 开启式成套开关设备和控制设备

开启式成套开关设备和控制设备是一种由支撑电气设备的支撑结构—安装框架所组成的成套设备,此电气设备的带电部件易被触及。此类设备是我国50年代产品,如今已被淘汰。

2.2 固定面板式成套开关设备

2.2.1 固定面板的开启式开关设备

固定面板的开启式开关设备见图3.2-1,该产品前面板(操作面)的防护等级至少为IP2X,而其他面仍易被触及带电部件。最显著的实例是20世纪50~70年代的BSL型和70~80年代的PGL型开关板,目前产量很少,只有少数落后地区使用。

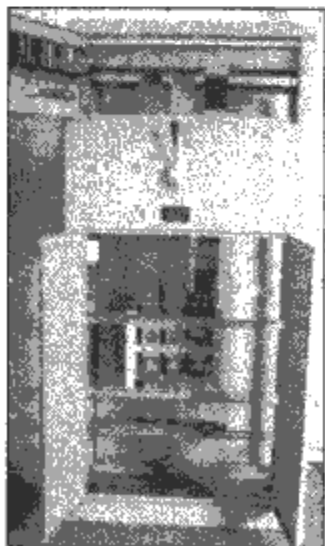


图 3.2-1 固定面板的开启式开关设备

2.2.2 技术要求

技术要求依据GB 7251.1—2005的第7章。除本篇第1章中在安全防护、绝缘配合节叙述外,补充要求如下:

(1) 为减少短路的可能性,对无防护的带电导体的选择安装,标准GB 7251.1—2005表5“导体的选择和安装要求”给出导体类型和安装要求的例子。

(2) 利用挡板或外壳进行防护应遵守下列要求:

1) 壳体的直接防护等级。对于户内使用的成套设备,如没有防水要求,下列IP值为优选参考值:IP2X或IP3X、IP4X、IP5X。

2) 金属外壳保护与带电部件之间的电气间隙和爬电距离不得小于标准规定的值,外壳是绝缘材料制作的例外。所有外壳或挡板均应安全地固定在其位置上。在考虑它们的特性、尺寸和排列的同时,还应使它们有足够的稳固性和耐久性,以承受正常使用时可能出现的变形和应力,保证标准规定的电气间隙和爬电距离。

3) 在移动挡板、打开外壳或拆卸外壳的部件(门、护套、覆板和同类物)时应满足:

a. 成套设备内装设一个屏障或活动挡板用来遮挡所有的带电部件,这样在打开门不会意外地触及带电部件。

b. 后面或内部的所有带电部件需要做临时处理(如更换灯泡熔芯)时,挡板后面或外壳内设置屏障或带电部件的电压符合超低电压条件,方可不用钥匙或工具移动或开启挡板。

(3) 固定安装的部件。主电路的连接只能在成套设备断电的情况下进行接线和断开。固定式部件可以在成套设备全部或部分断开下操作。为防止未经许可的操作,开关电器应带有机电连锁,以防止误操作。

2.2.3 基本结构

固定面板式开关设备的基本结构是由支撑结构、安装结构、安装板、固定式部件和组装在支架上的元器件组成。安装的元器件为固定式。而面板(操作面)的防护等级不得低于IP20。PGL型为典型产品。

3 封闭式成套开关设备

3.1 简介

封闭式开关设备为壳体表面全封闭的成套设备,设备的防护等级不低于IP2X。具体实例为:GGD、JK、GDT、ID2000型开关设备(透明门)等型号产品(见图3.2-2)。

3.2 主要技术数据

封闭式开关设备的主要技术数据(见表3.2-1):额定工作电压、额定工作电流、额定工作频率、额定短时耐受电流 I_{cw} 、额定峰值耐受电流 I_{pk} 、额定限制短路电流 I_{cc} 、额定熔断短路电流 I_{ef} 、电气间隙、爬电距离、外部导体所连接成套设备内的保护导体(PE、

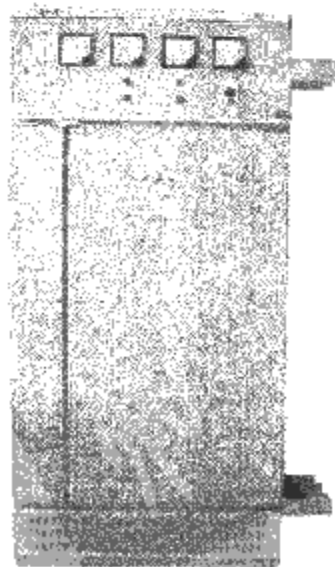


图 3.2-2 GGD 封闭式开关设备

PEN) 的截面、防护等级应符合标准要求。应通过直接的或由保护导体完成的相互有效连接来确保保护电路的连续性。

其中短路耐受强度的资料: 对于仅有一个进线单元的成套设备并设置 SCPD 短路保护装置时, 必须给出额定预期短路电流的最大允许值。短路保护装置为熔断器或限流断路器, 应指明电流额定值、分断能力、截断电流、 I^2t 。对于进线单元没有短路保护装置时, 可用下列一种或多种方法标注短路耐受强度:

- (1) 额定短时耐受电流 I_{cw} 及相关时间。
- (2) 额定限制短路电流 I_{cc} 。
- (3) 额定熔断短路电流 I_{cf} 。

3.3 基本结构

成套设备应能够承受一定的机械应力——电动应力及热应力, 还需经得起正常使用时遇到的潮湿的影响。为确保防腐, 裸露表面要涂上防腐层。

成套设备的结构部件有:

- (1) 支撑结构。是成套设备的组成部分, 用来支撑成套设备中的各种元件和外壳。
- (2) 安装结构。用来支撑封闭式成套设备的一种结构部件, 但是他不作为成套设备的组成部分。
- (3) 安装板。用于支撑各种元件并且适合在成套设备中安装的板。
- (4) 安装框架。用于支撑各种元件并且适合在成套设备中安装的一种框架。
- (5) 外壳。外壳是保护设备免受外部环境影响, 并使设备在各个方向不被直接接触的一种部件, 其防护等级至少为 IP2X。
- (6) 覆板。成套设备外壳上的一种部件。
- (7) 门。一种带铰链的或可滑动的覆板。
- (8) 可移式覆板。用来遮盖外壳上开口的一种覆板, 当进行某些操作或检修时, 可将其移开。
- (9) 挡板。对来自入口处各个方向的直接接触和来自开关器件以及类似器件的电弧进行防护的一种部件。
- (10) 屏障。用来防止无意识的直接接触, 但不能防止有意动作的一种部件。
- (11) 活动挡板。可以两种位置移动的部件。
- (12) 电缆入口。一种带有开口的部件。可以将电缆从此开口处引入成套设备中。
- (13) 封闭防护空间。成套设备的一种部件, 用来将电器元件封闭起来, 并提供规定的防护, 以防止外界的影响和接触带电部件。
- (14) 全部装配空间。框架单元中全部安装功能单元, 但这些功能单元部分用于备用单元。
- (15) 部分装配空间。框架单元中功能单元以外空间全部被安装, 被安装的功能单元取决于它的模数和尺寸。
- (16) 无装配空间。框架单元中连接母线的部分。
- (17) 自由空间。框架单元中的空间部分。

3.4 典型产品

典型产品有 GGD 封闭式开关设备 (见图 3.2-2)、ID2000 型开关设备 (透明门) (见图 3.2-3)。

(1) GGD 封闭式开关设备是目前用得较广泛的一种固定面板式开关设备, 方案较多, 结构以 FB 型材组装骨架为主, 有较完备的安全防护措施, 适用于电力、发电、工厂、楼宇、商贸等领域。

(2) ID2000 型开关设备是一种具有透明门的封闭式开关设备 (见图 3.2-3)。可直接观察到柜内电气设备的运行状况, 利于运行和维护, 受到用户的欢迎。可应用于大多数电力、配电场合。



图 3.2-3 ID2000 型透明门封闭式开关设备

3.5 金属壳体 II 类保护的成套开关设备 (GDT 型)

3.5.1 电气机械性能

GDT 型系列固定封闭式交流低压配电柜 (见图 3.2-4) 为例说明金属壳体 II 类保护的成套开关设备的电气机械性能。在 GDT 产品中, 对防触电保护有两种类别, 一类是 GDT-40、GDT20 柜, 设置了保护电路, 并保证任意点到主接地点的电路连续性 (接地电阻小于 0.1Ω), 它应属 I 类保护。另一类是 GDT06 II, 设置了用附加绝缘措施的保护绝缘, 实现防触电保护, 不再需要接地保护, 应属于 II 类保护。具体来说, 就是设置了具有加强绝缘的电气元件安装支架, 安装空间周围设有塑料隔板和盖板等。

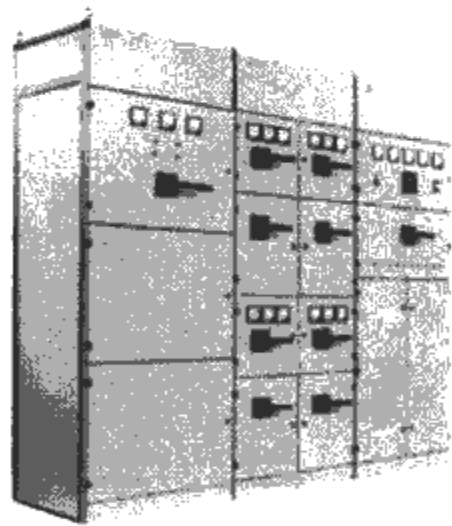


图 3.2-4 GDT 型金属壳体 II 类保护的成套开关设备

3.5.2 具有 II 类保护的成套开关设备特点

3.5.2.1 定义与分类

在低压成套开关设备和控制设备中有一种具有 II 类保护的成套开关设备, 通过采用非常规 (基本的绝缘配合) 绝缘以外的附加绝缘、补充绝缘、双绝缘, 构成成套开关设备对适用环境的 II 类保护。

下面说明利用这些补充的绝缘如何实现 II 类保护。

如果设备设计成能够在带电部分与可触及表面使用双重绝缘或加强绝缘, 那么, 如果下列要求也适用, 则认为这种设计符合 II 类保护要求。设计为 II 类保护的开关设备不应当具有

保护导体用的连接装置。然而，如果有保护导体穿过设备串联连接到以外的设备上，这项要求就不适用。在后一种情况下，保护导体及其连接装置应当采用基本绝缘与该设备的可触及表面采用保护隔离、超低电压、保护阻抗和限制放电能量的电路绝缘。这种基本绝缘应当与对串联连接设备的额定电压相应；金属外壳的Ⅱ类保护设备可以在其外壳上具有等电位连接导体的连接措施。为了功能的原因或者为了抑制过电压，Ⅱ类保护设备可以具有接地导体的连接措施。但是它应当如同带电部分一样被绝缘。Ⅱ类保护设备接地符号与Ⅱ类保护设备的标示见图 3.2-5。



图 3.2-5 Ⅱ类保护设备

(a) 接地符号（双重绝缘符号）；(b) 设备的标示

3.5.2.2 塑料壳体Ⅱ类保护的成套开关设备特点

全绝缘、全封闭结构，无需绝缘距离即可保证人身安全，防尘、防水、耐腐蚀、耐酸、耐碱、耐潮湿、耐碰撞，可用于户外，组合方便，出线方便（上、下、左、右四个方向），体积小，安装密度高，属紧凑型成套产品，其品种有低压成套设备、动力箱、照明箱、电缆分线箱（接线）等。

4 抽出式成套开关设备

4.1 简介

抽出式成套开关设备（见图 3.2-6）是含有利用功能单元实现连接和分离状态的抽出式部件的一种成套开关设备。这种抽出式部件可以从连接位置移动到试验位置、到分离位置，同时应保持与成套设备机械连接的可移动部件。它包括连接位置、试验位置、分离位置、隔离位置、移出位置等位置。

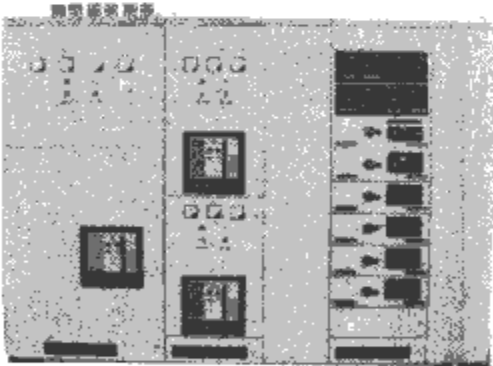


图 3.2-6 抽出式成套开关设备

4.2 主要技术参数及要求

4.2.1 主要技术参数

抽出式成套开关设备的主要技术参数见表 3.2-1。它除了与封闭式开关设备要求相同外，还对抽出式部件有特殊的要求。

4.2.2 抽出式部件的隔离距离

抽出式成套开关设备的功能单元安装在抽出式部件上，如设备处于新的条件下隔离距离至少要符合隔离器的隔离距离要求，同时考虑制造公差和由于磨损造成的尺寸变化。

表 3.2-1 抽出式成套开关设备的主要技术参数

额定工作电压 (V)	水平母线	额定电流 (A)
额定绝缘电压 (V)		额定短时耐受电流 (kA)
额定冲击耐受电压 (kV)		额定峰值耐受电流 (kA)
工频耐受电压 (kV)	垂直母线	额定电流 (A)
额定频率 (Hz)		额定短时耐受电流 (kA)
过电压类别		额定峰值耐受电流 (kA)
污染等级	器件、单元	固定式功能单元额定电流 (A)
		抽出式功能单元额定电流 (A)
	外壳防护等级	
	内部隔离形式	

4.2.3 可移动式部件或抽出式部件的设计

应使其电气设备即使是主电路带电的情况下，也可安全地从主电路上断开或接通。可移动式部件或抽出式部件可以配备插入式连锁在不同位置以及从一种位置转移到另一种位置时应保持最小的电气间隙和爬电距离。

4.2.4 可移动式部件应具有的位置

(1) 连接位置。可移动式部件或抽出式部件为实现其预期功能而处于完好的连接状态。

(2) 试验位置。抽出式部件的一种位置，在此位置上，有关的主电路已与电源断开但没有必要完全形成隔离距离，而辅助电路已接好，允许对抽出式部件进行运行试验。此时该部件仍与成套设备保持机械上的连接。

(3) 分离位置。抽出式部件的一种位置，在该位置时，主电路和辅助电路的隔离距离已达到要求，抽出式部件仍与成套设备保持机械上的连接。

(4) 移出位置。可移动式部件或抽出式部件在成套设备外部，并与成套设备在电器上均脱离的一种位置。

4.2.5 抽出式部件的连锁和挂锁

除非另有规定，抽出式部件应配备一个器件，以保证在主电路已被切断以后，其电器才能被抽出和重新插入。为防止未经许可的操作，可以给抽出式部件提供一个锁和挂锁（见表 3.2-2）。

表 3.2-2 抽出式部件在不同位置上的电器状态

电路	连接位置	位 置			
		连接位置	试验状态位置	分离位置	移出位置
进线主电路	进线电路插头和插座或其他连接器件		Y	○	○
出线主电路	进线电路插头和插座或其他连接器件		或 Y	或 ○	○
辅助电路	进线电路插头和插座或其他连接器件			○	○
抽出式部件电路的状况		带电	带电辅助电路操作试验的准备	如果不出现在反向供电则不带电	○

续表

电路	连接位置	位 置			
		连接位置	试验状态位置	分离位置	移出位置
成套设备主电路出现端子的状况		带电	带电或不分断	同上	如果不出现反向供电则不带电
		应满足 GB 7251.1—2005 的 7.4.4 条有关电荷放电的要求			

接地连续性应符合标准要求，并应一直保持到形成隔离距离。

| = 连接；○ = 分断； \diagup = 打开，但不分断（未形成隔离距离）。

4.2.6 辅助电路的连接方式

辅助电路应设计成在使用工具或不使用工具的情况下都能断开。如果是抽出式部件，辅助电路的连接尽可能不使用工具。

4.2.7 防护等级

成套设备的防护等级一般适用于可移式部件或抽出式部件的连接位置。制造商应指出在其他位置 and 不同位置之间转移时所具有的防护等级。如果移出时成套设备不能保持原来的防护等级，应达成采用某种措施防护的协议。

4.2.8 功能单元连接形式的说明

在成套设备或成套设备部件的内部功能单元电气连接的形式可由三个字母表示：

- (1) 第一个字母表示进线主电路的电气连接的形式。
 - (2) 第二个字母表示出线主电路的电气连接的形式。
 - (3) 第三个字母表示辅助电路的电气连接的形式。
- F—固定连接，D—可分离连接，W—可抽出式连接。

4.3 基本结构

抽出式开关设备柜体结构见图 3.2-7，抽出式开关设备母线系统见图 3.2-8。它有柜架、功能单元、母线系统等。抽出部件要有足够强度和隔离距离。在结构设计上应对抽出式部件提出要求，见 4.2 节。

4.4 典型产品

典型产品：GCK 型抽出式成套开关设备（见图 3.2-9），

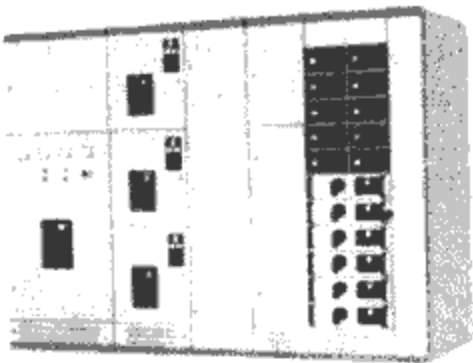


图 3.2-7 抽出式开关设备柜体结构

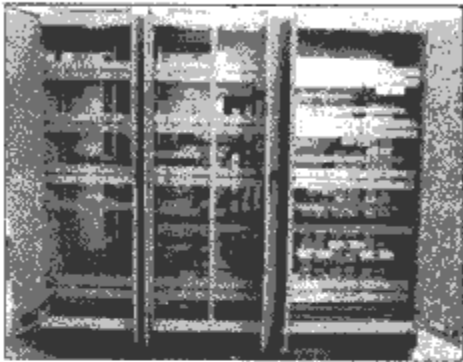


图 3.2-8 抽出式开关设备母线系统（背面）

GCK168Z 型抽出式成套开关设备，GCS 型抽出式成套开关设备和 modin3000，modin6000 及 SAVCON 等。

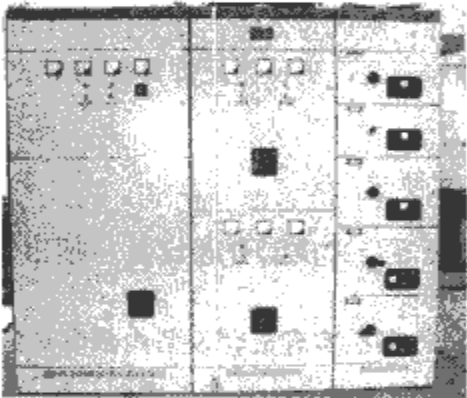


图 3.2-9 GCK 型抽出式成套开关设备

4.4.1 GCK 型抽出式成套开关设备

GCK 型抽出式成套开关设备的典型方案见图 3.2-10。

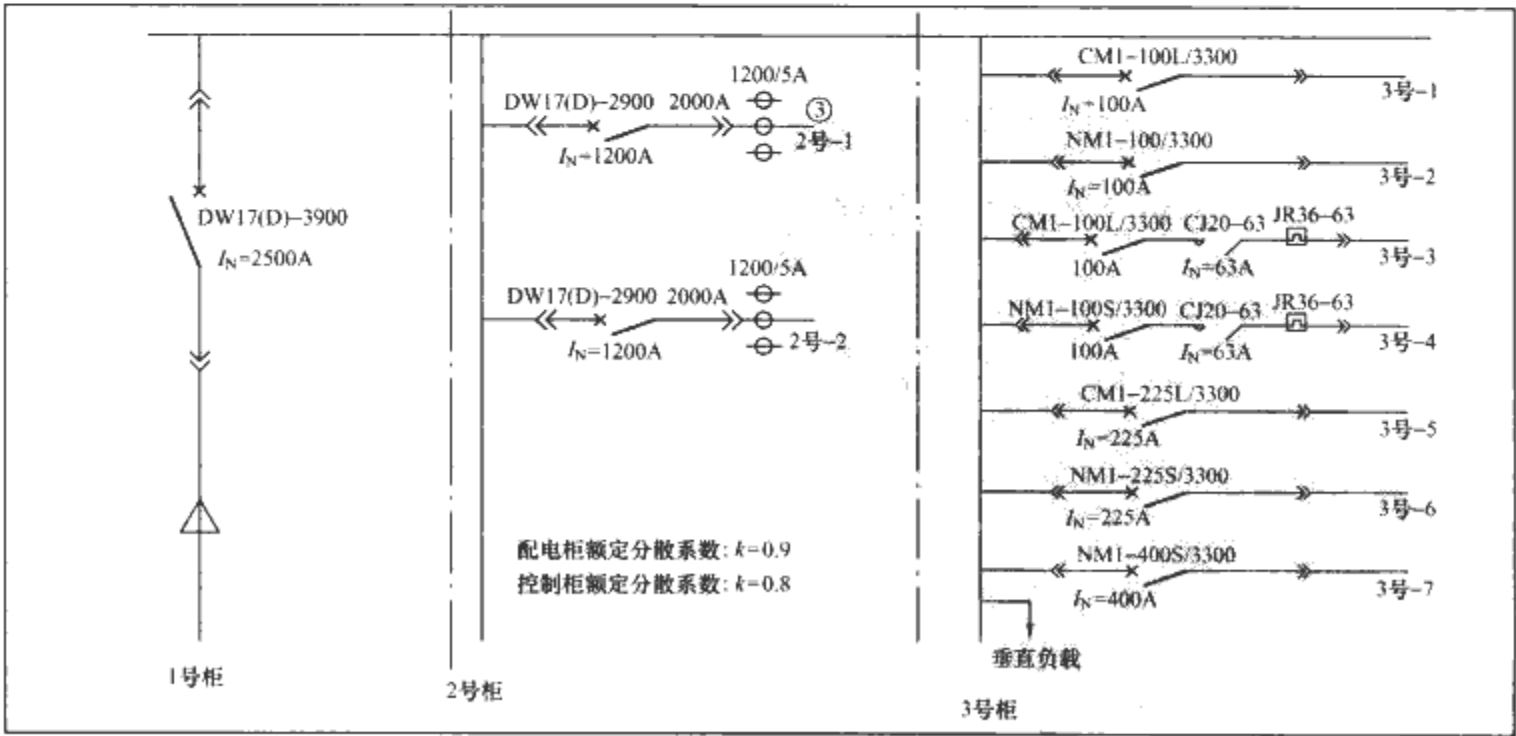


图 3.2-10 抽出式开关设备典型方案

4.4.2 GCS 型抽出式开关设备

GCS 型抽出式开关设备见图 3.2-11，其水平母线系统设置于柜体的后部，所有的进线都与其连接，出线设在出线柜的右侧部，用专用的出线单元部件与外部连接。GCS 型抽出式开关设备出线部件见图 3.2-12。

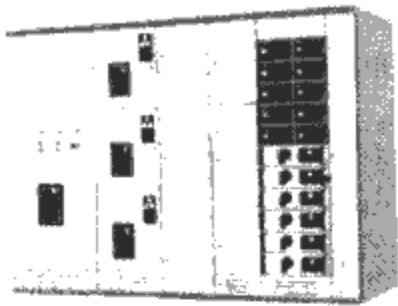


图 3.2-11 GCS 型
抽出式开关设备

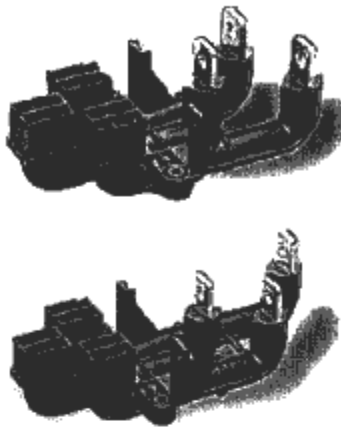


图 3.2-12 GCS 型抽出
式开关设备出线部件

5 抽出、分隔混合式成套开关设备

5.1 简介

抽出、分隔混合式成套开关设备是一种可同时具有抽出功能单元及安置于隔室内的功能单元的开关设备。如果不安装抽出功能单元，则成为分隔式开关设备（如将元件——塑壳断路器用抽屉安装，仍可使元件具有抽出功能，便于维修和更换）。

5.2 主要技术要求

抽出、分隔混合式成套开关设备与抽出式开关设备相同，并有如下补充。

5.2.1 用挡板或隔板实现成套设备内部隔离的典型形式

用挡板或隔板（金属的或非金属的）将成套设备分成单独的隔室或封闭的防护空间以达到下述一种或多种状态：

- (1) 防止触及相邻功能单元的危险部件。防护等级至少应为 IPXXB。
- (2) 防止固体外来物从成套设备的一个单元进入相邻单元。防护等级至少应为 IP2X（防护等级 IP2X 包括防护等级 IPXXB）。

如果制造厂没有提出异议，则上述两个条件适用。以下（见表 3.2-3）是用挡板或隔板实现成套设备内部隔离的典型形式。隔离形式和更高的防护等级应服从制造商与用户之间的协议。

表 3.2-3 抽出、分隔式成套开关设备内部隔离的典型形式

主 判 据	补 充 判 据	形 式
不隔离		形式 1
母线与功能单元隔离	外接导体端子不与母线隔离	形式 2a
	外接导体端子与母线隔离	形式 2b
母线与功能单元隔离，所有功能单元相互隔离，外接导体的端子与功能单元隔离，但端子之间相互不隔离	外接导体端子不与母线隔离	形式 3a
	外接导体端子与母线隔离	形式 3b

续表

主 判 据	补 充 判 据	形 式
母线与功能单元隔离，并且所有功能单元相互隔离，也包括作为功能单元组成部分的外接导体的端子	外接导体端子与关联的功能单元在同一隔室中	形式 4a
	外接导体端子不与关联的功能单元在同一隔室中，它位于单独的、隔开的、封闭的防护空间中或隔室中	形式 4b

5.2.2 隔板和挡板的稳定性或耐久性

所有挡板和外壳应安全地固定在其位置上。在考虑到他们的特性、尺寸和排列的同时，应使他们有足够的稳固性和耐久性，以承受正常使用时可能出现的变形和应力，而不减少规定的电气间隙和爬电距离。

5.2.3 对进行维修而接近成套设备（包括已断开的功能单元进行维修时的可接近性）的要求

在相邻的功能单元或功能组仍带电的情况下，对成套设备中已断开的功能单元或功能组按照制造商和用户的协议进行维修时，应采取必要的措施。对由制造商和用户的商定所采取的措施的选择取决于使用条件、维修周期、维修人员的能力、现场安装规则等。这些措施包括适当的隔离形式的选择，可以是：

- (1) 在需维修单元、功能组合相邻的功能单元或功能组之间应留有足够大的空间。建议对维修当中可能移动的部件最好有夹持固定措施。
- (2) 使用挡板用来防止直接接触相邻功能单元和功能组。
- (3) 对每个功能单元或功能组使用隔室。
- (4) 插入制造商提供或规定的附加保护器件。

5.2.4 在带电的情况下为扩展设备而接近成套设备的要求

若需将来的扩展功能单元和功能组，应根据制造商和用户协议的规定。这些要求同时适用于现有电缆带电情况下，增加出线电缆。母线的扩充和附加的单元与其进线电源连接时，不应在带电的情况下进行，除非成套设备的设计允许带电连接。

5.3 主要技术数据

技术数据以 GCK168Z 型抽出式开关设备为代表，见表 3.2-4。

表 3.2-4 GCK168Z 型抽出式开关设备的技术数据

过电压类别	IV
污染等级	3
额定冲击耐受电压 (kV)	8,6
工频耐受电压 (kV)	3
额定工作电压 (V)	660,380
额定绝缘电压 (V)	800,690
额定频率 (Hz)	50

续表	
水平母线	
额定电流 (A)	5000, 4000, 3150, 2500, 2000
额定短时耐受电流 (kA)	100, 80, 65
额定峰值耐受电流 (kA)	220, 170, 148
垂直母线	
额定电流 (A)	1000
额定短时耐受电流 (kA)	80, 65
额定峰值耐受电流 (kA)	170, 148
各类器件额定值	
断路器单元额定电流 (A)	至 4000
固定式功能单元额定电流 (A)	至 630
抽出式功能单元额定电流 (A)	至 500
内部隔离	形式 1~形式 4
外壳防护等级	IP40, IP30

5.4 基本结构

隔板：用来将一个隔室与其他隔室隔开的一种部件，是抽出、分隔混合式开关设备的主要部件，以 SAVCON8PF 为代表（见图 3.2-13 和图 3.2-14）。

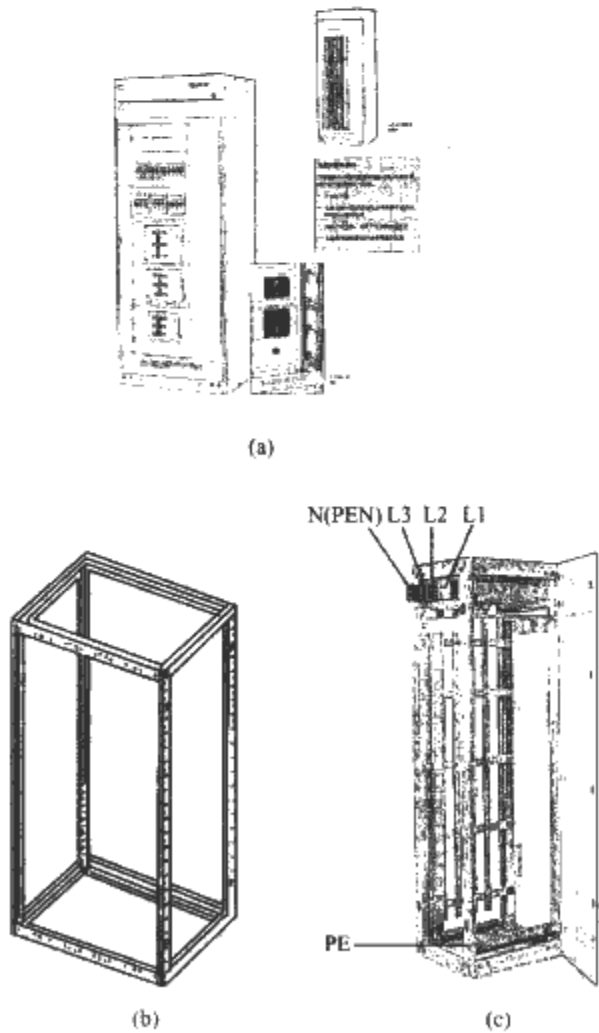


图 3.2-13 SAVCON8PF 的结构

(a) 整体结构；(b) C 型材骨架；(c) 母线系统（顶部和后部）

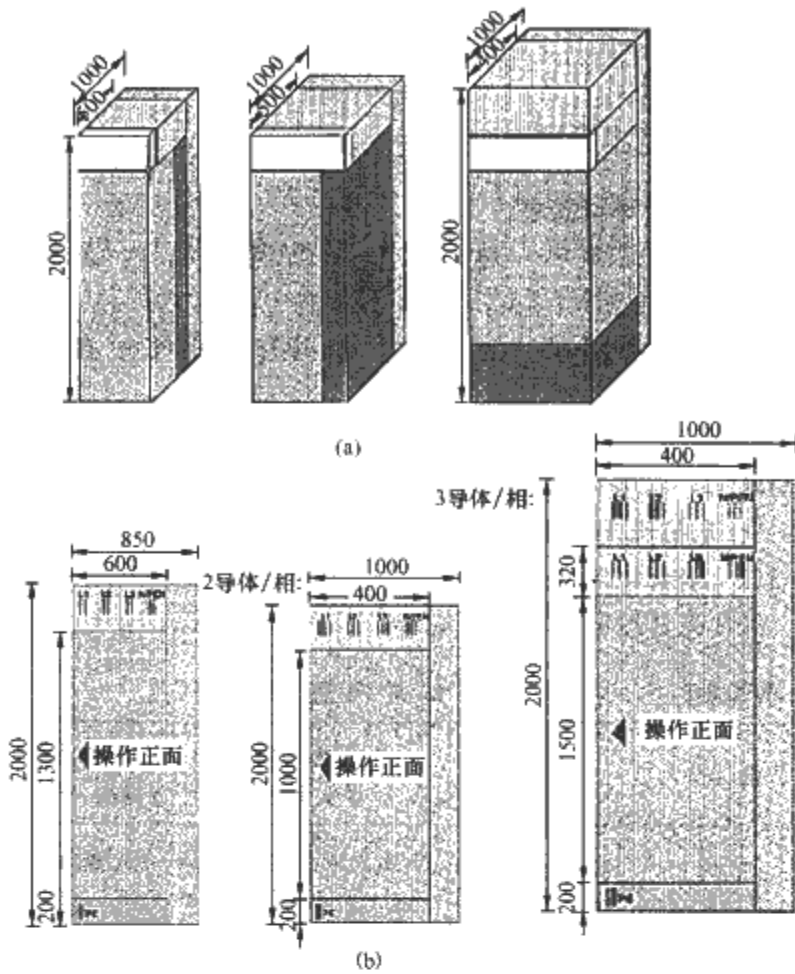


图 3.2-14 SAVCON8PF 的柜体功能分隔区
(a) 区域布置；(b) 水平母线及垂直母线图

5.5 典型产品

5.5.1 GCK168Z 型抽出式开关设备

智能型混合式开关设备。它适合于 5000A 以下用于低压电网中动力中心主配电设备、电动机控制中心、分配电设备、无功补偿等。技术上采用标准的现场总线（PROFIBUS），将具有通信能力的开关器件连接（或通过接口单元），实现上位机（主站）通过总线对用户（从站）进行数据通信，达到遥控、遥调、遥测、遥信功能。结构上柜体采用带筋的 C 型材做成柱和梁，并用铝合金角连接器拼装而成。电气连接有可抽出连接和固定连接。全部金属部件均用敷铝锌板材料。

5.5.2 MODAN6000 模数化配电系统

MODAN6000 柜分三种柜型：MDP 用于安装 630A 空气断路器，MDM 用于安装 630A 以下回路的抽出单元，MDG 用于固定安装。可背靠背安装，电缆从柜顶部进、出。主母排位于柜后 200mm 深的区域，可分上、中、下放置三组母线排。主母排为 1000~6300A 八个规格。垂直母排有 1000A 和 1600A 两种，采用异型（C 型），母排截面为 40×40（mm²）和 70×70（mm²），使其载流能力加大、机械强度高、实现无孔连接。在断路器的下部设置了灭弧装置，可在内部故障引起电弧情况下保护。

6 箱组式成套开关设备

6.1 简介

箱组式成套开关设备是箱式和箱组式两种开关设备。两种设备的区别为：前者为独立箱式，后者为箱式组合体。箱式——安装在垂直面上的一种密封式开关设备；箱组式——数个箱式成套设备机械地组合在一起的一种组合体，它可带有或不带有公共支架，可通过两个相邻的箱式成套设备的连

接面的孔进行电器连接。一般将其做成具有Ⅱ类保护的成套开关设备。

6.2 主要技术参数

6.2.1 使用环境条件

- (1) 环境温度。超过 24h 平均值 + 35℃，最高值 + 40℃，最低值 - 5℃。
- (2) 相对湿度。短时间，在 40℃ 时 50%；在 25℃ 时 100%。
- (3) 不带清洗剂高压冲洗。水压最大 65bar（1bar = 100kPa），水温最大 50℃，距离 ≥ 5m。
- (4) 抗撞击强度。10J。

6.2.2 壳体材料性能

Mi 壳体材料性能见表 3.2-5。

表 3.2-5 Mi 壳体材料性能			
部 件	Mi 壳体	导线输入管 接头 ESt	导线输入管 接头 AKS
材料	PC-聚碳酸酯	EVA-乙烯、醋酸乙烯	PA-聚酰胺
温度稳定性	(-40~90)℃	(-25~80)℃	(-40~100)℃
耐燃烧性 热灯丝试验	650℃	650℃	960℃
化学稳定性	(+=稳定, 0=有条件稳定, -=不稳定)		
酸 10%	+	+	+
碱 10%	+	+	0
酒精	0	+	+
汽油	+	0	+
苯(最大浓度)	-	0	+
石油(最大浓度)	+	0	+

对化学稳定性的说明仅供参考，针对具体情况必须结合其他化学元素及环境条件（如温度、浓度等）进行检测

6.2.3 壳体的热耗散能力

根据 GB 20641—2006《低压成套开关设备和控制设备空壳体的一般要求》的规定，所有壳体制造商都应提供冷却表面有关的热耗散能力的资料，以向用户提供选择安装电气设备的正确数据。假定所选设备产生的热在保护空间内部分散均匀。对于壳体为塑料材料的开关设备也需要给出空壳体热耗散功率。

6.2.4 主要的电气方案

主要的电气方案包括受电、馈电、母联、电动机供电、电动机可逆、Y-△起动、补偿、双电源、隔离、联络等多种，安装应根据柜体宽度和安装板模数（例如：高为 150mm、宽为 250mm）进行布置（称为单元）。

6.3 基本结构

箱组式低压动力配电柜是由许多箱体拼装组成。不同的箱体尺寸、不同单元都是按模数规律组合。下面以典型产品说明。

6.4 典型产品

Mi 型塑料箱组式低压成套开关设备。箱体本体为聚苯乙烯热塑性塑料，箱盖为聚碳酸酯。箱体结构见第 2 章 4.3.1，箱组式低压成套开关设备是由空箱体及各种功能箱体按照一定模数经拼装而成。功能箱体分类如下：

- (1) 通用功能箱体。
- (2) 断路器箱。适用于放置 160~1000A 断路器的箱体。
- (3) 负荷隔离开关箱。适用于放置 63~1000A 的负荷隔离开关，可适用 3+PE+N 接线。
- (4) 刀熔开关箱。适用于安装母线适配系统式 125~630A 刀熔开关。
- (5) 仪表箱。适用于安装单个或多个计量仪表。
- (6) 配电照明箱。适用于安装小型断路器等元件的箱体。
- (7) 汇流排箱。适用于配电柜的水平母线（150~1000A）走线或安装有适配系统的刀熔开关等。

7 低压固定分隔柜

适用于发电厂、变电站、石油化工、冶金、厂矿企业、高层建筑等低压配电系统中，作为动力配电和电动机控制中心、电容补偿等电能转换、分配与控制用。低压固定分隔柜的结构特点：

- (1) 通常柜架采用 E=25mm 或 E=20mm 间隔模数的 C 型材及自制模数化零部件，通过自攻锁紧螺钉和高强度六角螺栓紧固连接而成，该种结构免除了焊接变形和应力，且零部件通用性高，使得柜架组装灵活方便、速度快捷、精度高。
- (2) 整个柜体采用固定分隔式结构，内部各功能单元所安装的断路器采用抽屉式或插入式结构，维修或更换断路器快捷方便，并能形成明显的断开点。
- (3) 柜体分为功能单元小室、水平母线小室、电缆小室，各小室之间采用镀锌钢板制成隔件或挡板进行相互隔离，各小室的作用相对独立，限制了事故影响范围。
- (4) 骨架及内部结构件表面都进行镀锌钝化处理或采用敷铝锌钢板，保证接地连续性。柜门、顶盖、后门、护板等外观可见部件均采用环氧粉末静电喷涂，涂层均匀美观耐腐蚀。
- (5) 受电柜、大电流馈电柜的断路器采用抽屉式，馈电柜（或 MCC 柜）断路器采用插入式结构。
- (6) 装置为柜前操作，柜后出线，柜前柜后维护型，其水平母线均安装于柜的顶部，可从柜顶进行母排的现场安装与连接，安装与维护简单、方便。垂直母线位于柜体中部，并用由阻燃塑料注塑成型的带透明观察窗的母线罩进行隔离。母线系统带电部分的防护等级达到 IP2X，有效防止电弧引起的放电和防止人体接触。
- (7) 馈电柜分为两种结构形式：一种为上下分隔结构，简称单排分隔馈电柜和控制柜（见图 3.2-15），其功能单元小室的高度（mm）分为 200，400，600 三种，每柜最多可装 9 个 200mm 的小室；另一种为左右分隔结构，简称左右分隔馈电柜和控制柜（见图 3.2-16），其功能单元小室的高度（mm）分为 450，600，900 三种，每柜最多可装 8 个 400mm 和 450mm 的小室，两种分隔形式的功能单元之间均有带通风孔的镀锌金属板相隔离。

8 密封式成套开关设备

密封式成套开关设备是指成套设备的防护空间是全封闭

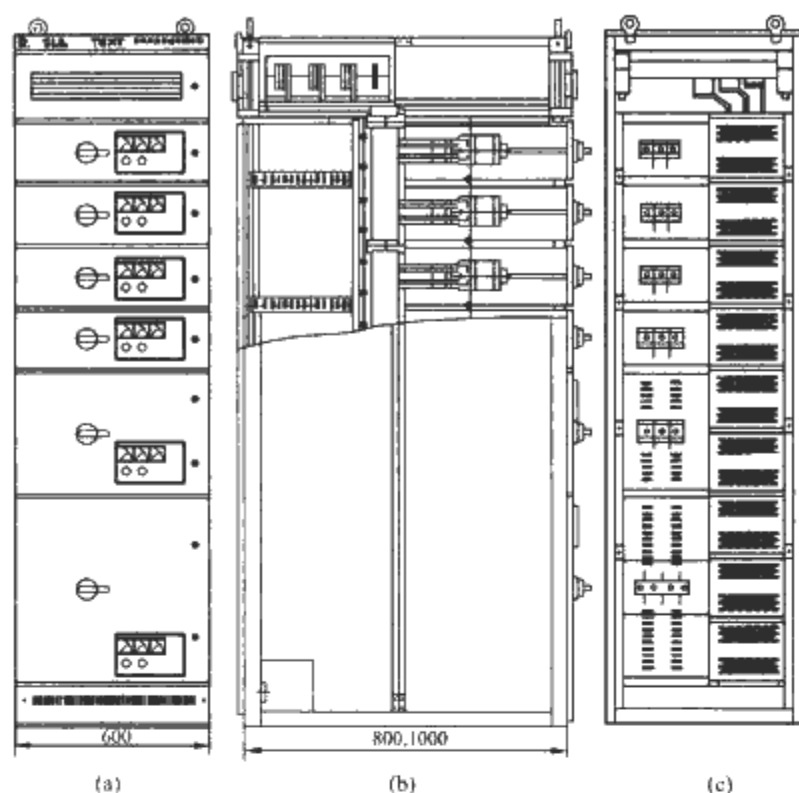


图 3.2-15 单排分隔馈电柜和控制柜
(a) 外观；(b) 拆去侧板；(c) 拆去后门、通风罩

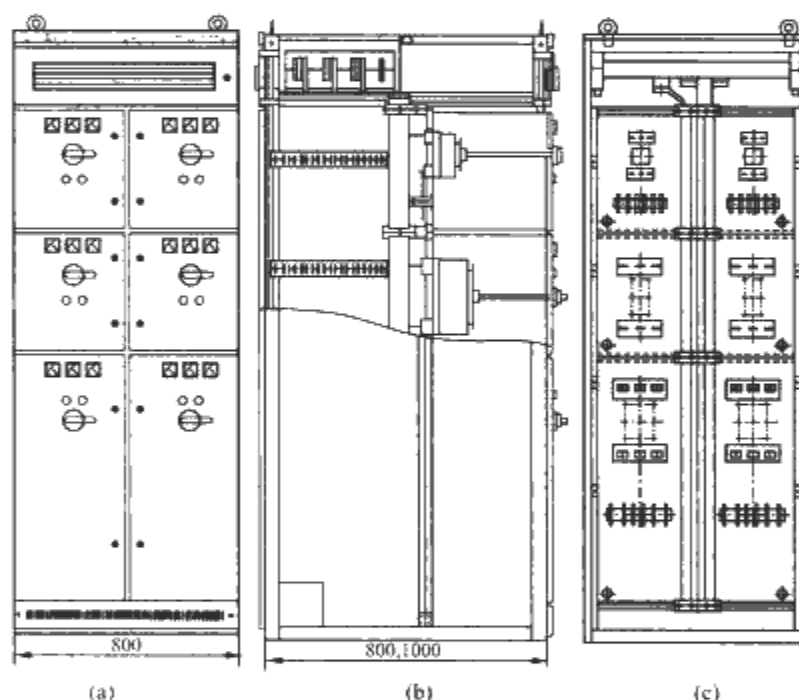


图 3.2-16 左右分隔馈电柜和控制柜
(a) 外观；(b) 拆去侧板；(c) 拆去后门、通风罩

的（壳体是密封的），它的防护等级至少是 IP54 以上，此时柜内安装的电器设备处于密闭空间内，其所产生的热量不能像其他的例如开启式、固定面板式、封闭式成套开关设备那样，通过空气通道自由流通，方便地进行壳体内外的空气进行热交换。密封式成套开关设备内部产生的热量只能通过壳体的表面与柜周围空气进行对流热交换或通过强迫通风进行空气热交换散出柜外。此时要保证柜内电气元器件的温升不超过允许值，就要进行开关柜的热设计，从而保证成套设备的安全运行。包括由于内部短路故障引起电弧情况下，成套开关设备的保护与安全运行。

在结构上及制造工艺上要进行特殊设计与加工（例如在所有缝隙上及电缆出入口加密封条）。

9 柜组式成套开关设备

柜组式成套开关设备是指数个柜式成套设备机械地组装

在一起的组合体。它一般包括多个进线柜及配电柜等，体积较大，通常在运输时要将组合体分拆成若干单元，以便运输，到现场再进行组装。

10 在内部故障引起电弧情况下成套开关设备的特种保护

10.1 内部故障引起电弧的定义

10.1.1 故障引起电弧情况下预期电流

故障引起电弧情况下预期电流的定义是：由制造厂给出一个值，该值为进线单元端的预期短路电流最大允许值。它与相应的允许电弧持续时间一起来满足试验规定的要求。该值是电流分量的均方根值，相应的功率因数和峰值已由 GB 7251.1 给出定义。

10.1.2 允许电弧持续时间

允许电弧持续时间的定义是：由制造厂给出一个最大允许电弧持续时间，它与在电弧情况下相应的允许预期电流值一起来满足该试验规定的要求。成套设备中的不同短路保护器件有不同的值。

10.1.3 电弧情况下允许限制短路电流

电弧情况下允许限制短路电流的定义是：由制造厂给出一个电流值，该值为用一个限流开关器件保护成套设备的最大允许预期电流值，以满足该试验规定的要求。

10.2 在内部故障引起电弧情况及保护

在内部故障引起电弧情况是指在封闭式低压成套开关设备和控制设备内产生的电弧所伴随着的各种物理现象。例如：在外壳内正常气压下产生的电弧的能量将引起内部压力升高和局部过热，将造成成套设备的机械应力和热应力，此外涉及材料可能产生热蜕变产物，以气体或蒸汽的形式释放到壳体的外部。

内部故障引起电弧情况要采取一系列的技术措施，这些措施是从检测故障电弧、评价估算电弧及其影响，在壳体内部结构设计采取的隔板、挡板隔离，电气防护等入手，直到最终用试验验证手段，对成套设备抗击内部故障电弧的能力做出评估，以确认成套设备在内部故障引起电弧情况下的运行安全。例如考虑内部过压力作用在盖板上、门上，也考虑电弧作用到外壳上的热效应、喷射出的热气体和流动粒子的热效应，要求不损坏内部隔板。它不包括构成内部危险的所有热效应，如毒气。

为保护封闭式低压成套设备，制造厂必须给出限流开关器件（如限流断路器或熔断器）的特性（电流额定值、分断能力、截断能力、 I^2t 等）。

10.3 一种顶板释压装置

10.3.1 简介

当开关柜处在密封情况下发生了短路故障，由于燃弧使许多介质燃烧，产生大量气体，由于短路是瞬间发生的，从而使气体瞬间升压，如果这些多余的气体不能及时释放，则将对开关柜造成破坏。因此采取的技术措施是在柜的顶部设置一种顶板释压装置进行释压。其释压原理为：正常时由于弹簧的作用（向下的压力）将释压装置压紧，保持开关柜的密封性。当短路发生后，产生的高压气体作用于弹簧，将其顶起，然后将柜顶部缝隙打开释放气体，释放完毕后弹簧恢复原位，开关柜也恢复正常工作状态。

10.3.2 顶板释压装置

用于箱组式成套设备的顶板释压装置。它由面盖固定栓、弹簧、铅封盖、面盖锁组成。首先用工具将面盖顺时针旋转 90°之后面盖在弹簧的作用下自动弹起，用工具向下压紧并逆时针旋转锁扣，安装完毕。当箱体内部压力因内部短路，产生瞬间压力剧增，将弹簧压缩，并将箱顶部顶开，使空气释放，保护箱体不受破坏。此类装置也可用于其他成套设备。

10.3.3 释压装置弹簧的设计

释压装置弹簧是依据在短路后产生的气爆压力大小而设计。先假设短路产生的热能完全转化为气体爆轰的动能，并认为周围介质的压力和密度可以忽略不计。再根据爆轰理论，在一定的高温（温度）下，气体会产生一定的压力。假定短路发生在用铜材料制作的母线处，即短路后产生高温材料的是铜材料，其沸点为 2580℃，由固体直接升华为气体。此气体温度时的爆轰空气超气压（见表 3.2-6），将会产生大约 500~600MPa（50~60kgf/mm²）的超强压力，为此弹簧压力工程设计值应不低于 500~600MPa，同时有最大位移（压缩量），压缩长度 10mm（可认为此缝隙足以将爆轰产生的气体释放到柜外），压缩力 640MPa，在 1/10 最大压缩力时，弹簧有 1mm 的压缩长度（此时压力为 60MPa）。

表 3.2-6 气体爆轰时空气冲击波参数

空气超强压力 <i>p</i> (MPa)	空气温度 <i>t</i> (℃)
10	353
100	787
400	2010
500	2400
1000	3800
6000	10 400
8000	11 800
10 000	12 800

10.3.4 顶板释压装置试验验证

天津气传动设计研究所设计制造的 Mi-GST 型全塑组合低压成套开关设备（额定电流为 1000A 的进线柜）进行了壳体气压释放试验。柜内中部左侧为装置内部薄弱环节——PE 线，使其短路后产生电弧。试验结果达到预期效果。

下面将该试验简述如下：

10.3.4.1 试验目的

考核 Mi-GST 全塑箱式低压成套开关设备壳体气压释放验证。

10.3.4.2 试验要求

Mi-GST 全塑箱式低压成套开关设备，规格：Mi 1000A。

(1) Mi-GST 全塑箱式低压成套开关设备母线（相对地）通以短路电流（电流有效值为 18kA，电流峰值为 36kA），使装置内部薄弱环节——PE 线产生电弧，高压气体形成并释放到柜外。

- (2) 检查壳体气压释放后对柜体外壳的影响。
- (3) 观察短路电弧产生后对装置壳体的影响。检查箱体尺寸有无变形，外观无明显变化，密封良好，其他电器安装尺寸无变化。

10.3.4.3 试验结果

额定峰值耐受能力下壳体气压释放验证数据见表 3.2-7。

表 3.2-7 额定峰值耐受能力下壳体气压释放验证数据表

额定峰值耐受能力下壳体气压释放验证			
试品名称、规格：MI-GST 全塑箱式低压成套开关设备			
1. 试验依据：GB 7251.1—2005			
2. 试验要求			
试验电压有效值 (V)		试验电源相数	三 相
试验电流峰值 (kA)	36+10% —5%	通电时间(s)	≥0.1
试验电流周期分量 有效值(A)		试验次数	1
热稳定值(A ² ·s)×10 ⁶			
3. 实测参数			
试验相序	U (试品 U 相)	V (试品 V 相)	W (试品 W 相)
试验电压有效值 (V)	418	418	418
试验电流峰值 (kA)	41.3	36.8	32.2
通电时间 (s)	0.106	0.106	0.106
热稳定值(A ² ·s)×10 ⁶			
4. 试验结果			
机械部件和绝缘件有否 损坏及可观察得变形	装置内部薄弱环节——PE 线熔断		
触头有否发生熔焊、触头 功能单元有否自动弹 开或不允许的位移	无		

10.3.4.4 结论

- (1) Mi-GST 全塑箱式低压成套开关设备母线（相对地）通以短路电流（电流有效值为 18kA，电流峰值为 36kA），装置内部薄弱环节产生电弧，高压气体形成释放。
- (2) 壳体电弧高压气体顶開箱盖，有效释放气体。
- (3) Mi-GST 全塑箱式低压成套开关设备壳体内气体释放后，箱体几何尺寸无变化，外观无明显变化，密封良好，其他电器安装尺寸无变化。
- (4) 试验后，由于 PE 线（装置内部薄弱环节——铜材料制作）熔断，随着超高压压力喷向壳体内箱壁，犹如在箱内镀了一层金属。

第3章 低压动力配电柜(箱)

1 简述

在低压成套开关设备和控制设备中,低压动力配电柜(见图 3.3-1)方案灵活,使用方便等特点立足于电气成套设备市场中。低压动力配电柜是适用于额定电压交流不超过 1000V,频率不超过 1000Hz,直流不超过 1500V 的低压成套开关设备和控制设备。低压动力配电柜由开关元器件和与之相关的控制、测量、信号、保护等设备,用结构部件完整地组装在一起的一种组合体。动力柜多为单一柜体,需要时可以拼柜(通常设计时就要考虑到用户的需求)。

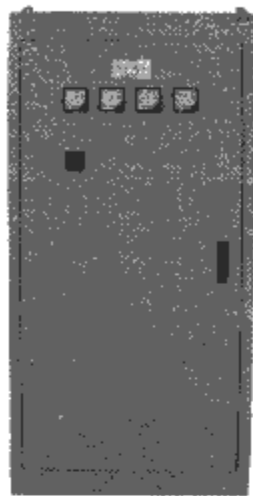


图 3.3-1 低压动力配电柜

2 分类

低压动力配电柜的分类原则是:

- (1) 按在低压配电系统中的位置分。分支配电设备、末端配电设备、专用动力控制设备(参见本卷第1篇)。
- (2) 按组装、电气连接工艺形式分。一般通用电气连接工艺、母线适配技术安装。
- (3) 按服务(控制、供电)领域与功能分。泵类、风机、压缩机等通用机械的起动、控制用、建筑用、消防专用、矿用(含井下用、井上用),各类工业机械成套控制(卷扬、提升、筑路机、印刷机、造纸机械、工业锅炉用、冶金电炉用、各种电源柜、电源切换柜等)。
- (4) 按负载性质分。转化为动力源的动力柜、供照明负荷用的配电柜(如居民小区的进户配电柜)。
- (5) 按安装方式分。立式安装、靠墙安装、墙体镶嵌安装、现场组合安装、带底座与不带底座、带上罩不带罩式等。
- (6) 按柜体材料分。钢质制、工程塑料制、不锈钢制。
- (7) 按柜体结构分。整体焊接(无骨架)、有骨架式、型材组装式、箱组式、可拼柜式。

3 技术要求

3.1 基本技术要求

各种类型动力配电柜在没有专门的技术标准时,都要遵循低压成套开关设备的标准 GB 7251.1 所规定的各项要求,这些要求已经在本卷第1篇及本篇第2章中叙述。在 GB 7251.1 中指出对于短路强度要求在 10kA 以下的设备,可以不用型式试验验证。动力柜在配电系统中属于系统中分支配电设备类,有的属于末端配电设备类,所以多数的动力柜短路强度要求都低于 10kA。

3.2 特殊技术要求

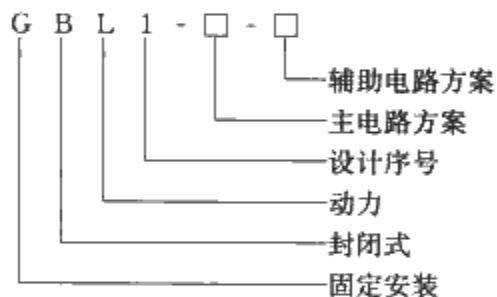
某些动力柜,如自耦减压起动柜、星三角起动柜、双电源切换柜等有自身的技术标准时须按它们各自的标准设计和生产。例如,自耦减压起动柜允许的连续起动次数不超过 6 次,就是考虑自耦变压器连续起动产生的温升不超过自耦变压器允许值(自耦变压器为短时工作制)。

4 交流低压动力柜

4.1 GBL1 交流低压动力柜

交流低压动力柜是采用薄钢板弯制成类似型材,并通过螺钉组装成柜体,有间隔结构形成间隔室(水平母线隔室、电缆隔室、保护母线隔室),功能单元按用途分进线、馈电、照明、控制等,为靠墙安装,可多台拼柜。外形典型尺寸宽 400mm, 600mm, 800mm, 深 400mm, 高 1800mm。防护等级 IP30。可用于发电厂、变电站、厂矿企业中作为额定电压不超过 380V 的动力、照明配电。

4.1.1 型号含义



4.1.2 主要技术数据

- (1) 主电路额定工作电压 380V。
- (2) 辅助电路额定工作电压 380V, 220V。
- (3) 额定绝缘电压 660V。
- (4) 额定短时耐受电流 15kA, 30kA。

4.1.3 结构方面技术说明

每台柜有若干隔室,隔室间有金属隔板,单元隔室与电缆室之间有金属或绝缘隔板,隔板上开孔,以便电缆通过,单元隔室侧面开有通风孔。单元高度(mm)为 100, 200, 300, 400, 500, 600。动力柜具有工作和分离两种状态,处于工作位置时隔离室的门全部关闭。主开关操作手柄与门之间有连锁装置。

4.2 XL 型系列动力柜

XL 型动力柜,也称箱力(XL)系列动力柜,是我国新中国成立以后出现的最早、应用最广的动力柜。XL 系列代号:XL-21、XL-22、XL-23、XL-24、XL-25、XL-31、XL-35、XL-41、XL-42、XL-44、XL-51、XL-52 等,代表多种用处,多种防护等级,多种进出线方式,有、无底座,有、无上盖等,具体型号与用处请见有关设计手册和样本。

4.3 箱组式低压动力配电柜

4.3.1 塑料箱组式低压动力配电柜

- (1) 塑料箱组式低压动力配电柜(见图 3.3-2)是

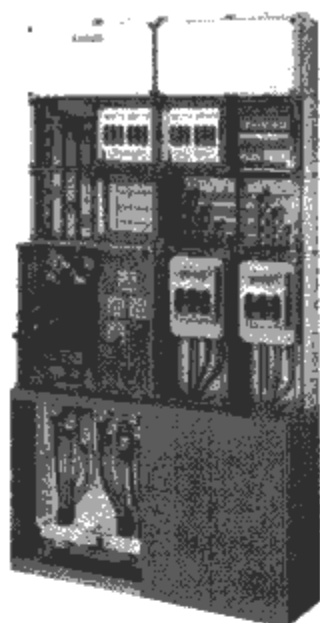


图 3.3-2 Mi1000 箱组式低压动力配电柜

GB 7251.1规定的一种成套开关设备的形式。最早出现在德国，20世纪30年代为铸铁材料，60年代后出现工程塑料材料，箱体本体为聚苯乙烯热塑性塑料，箱盖为聚碳酸酯。以Mi产品为例：它由5种模数（150mm）基本尺寸的箱体（1号箱体150mm×300mm，2号箱体300mm×300mm，3号箱体450mm×300mm，4号箱体600mm×300mm，8号箱体600mm×600mm）经组合拼装而成（箱体的号数为最小箱体的体积倍数）。可拼成电流达400~1000A的配电产品。其防护等级为IP65（如使用

通风带窗口附件，则防护等级为IP23），电击防护类别为Ⅱ类（全绝缘，以回为标志）。除去供应空壳体外，还供应安装微型断路器（MCCB）的箱体、安装仪表的箱体、安装螺旋式熔断器的箱体等Mi产品功能箱体，还配有在壳体和箱盖之间加使壳体加厚的中间框（每个中间框可以加厚85mm），最多允许加两个中间框（有关箱体的技术说明见本篇第2章）。

（2）Mi1000箱组式配电柜。Mi箱组式配电柜由若干空壳体、不同电气功能的电器安装箱体，通过模数化组合拼装而成。其空壳体、不同的电气功能箱体及组成的配电柜的示意图见本篇第2章。

4.3.2 金属箱组式低压动力配电柜

金属箱组式低压动力配电柜是20世纪末期发展的一种可现场快捷装配的动力箱（柜）。其中有代表意义的是MC型配电装置，称为“用户可自行成套的模块组合式金属配电装置”。

4.3.2.1 产品特点及技术指标

（1）从壳体的生产、组装，直至现场安装全部模块化。可实现模块化柜壳体系，模块化壳体组合，有模块化电器安装、电器元件组块，柜体的快捷安装。

（2）模块化柜壳体系。全部壳体的厚度均为250mm，而高与宽的基准模数为350mm和600mm两种。实际的宽可设置为模数的整数倍，完成不同尺寸柜体的拼装。

（3）模块化壳体组合。MC的壳体是由不同尺寸的柱、筋、角连接件组合而成，在现场安装时，将底、侧、顶板、安装轨道组合，并可随时扩展。

（4）模块化电器安装、电器元件组块，元器件组块的基准模数为150mm（高）×250mm（宽）。

（5）柜体的快捷安装。柜体的快捷安装指的是柜体的固定。柜体通过固定架固定和没有固定架固定两类固定方式。

（6）防护等级为IP65。

（7）保护种类为Ⅰ类（带接地保护）。

（8）机架由镀锌加喷涂的敷塑钢板制成（指在钢板的表面均涂敷塑料材料）。

4.3.2.2 模块化柜壳体系

不同尺寸柜体的拼装，全部壳体的厚度（柜深）均为250mm，而高与宽的基准模数为350mm和600mm两种，实际的宽可设置为模数的整数倍，高度（mm）为650，850，1050，1450，1750五种，根据需要，最终可拼装成若干类

型的动力柜。模块化的所有侧面都可拼装组合（依据水平方向的相同组合高度，或垂直方向的相同组合宽度原则完成拼装）以适应现场需要。

4.3.2.3 模块化壳体组合

MC的壳体也是由不同尺寸的柱、筋、角连接件。在现场安装时，可首先将起电气安装作用的底板及安装导轨拼接在一起（先不加侧壁，以使先行的电器装配有足够的回旋空间），安装电器后，依次装柱、侧、顶板、仪表、操作手柄等，完成组装，此后配电设备可随意扩容、扩展。

4.3.2.4 模块化电器安装、电器元件组块

元器件组块的基准模数为150mm（高）×250mm（宽），安装组块按照GB7251.1的要求进行。组块工作电流最大至630A。然后拼装成动力配电柜。

4.3.2.5 柜体的快捷安装

柜体的快捷安装指的是柜体的固定。柜体通过固定架固定，有站立式、靠墙式、悬挂固定式、带上罩底座式、带柱挂墙式、背靠背安装式、底盘并列式等。

4.4 采用断路器—熔断器配置的低压动力配电柜

产品的特点：在动力柜的电器线路配置上（为民用电负荷供电），多数是断路器（上级）—断路器（下级）配置，然而在欧洲及我国的南方也有采用断路器—熔断器配置的低压动力配电柜。它的优点是：充分利用熔断器的熔断特性与断路器脱扣特性有效配合，减少了故障频次，提高了配合的选择性。装置还带有监控低压系统运行状态的电网监测仪。

5 采用表面安装技术的低压动力配电柜

20世纪80年代采用独特工艺技术，诞生了母线式负荷隔离开关：熔断器与刀开关一体化安装，以其组成采用表面安装的低压动力配电柜。它不需使用安装板和母线打孔连接，直接挂在母线上进行连接，使下进上出、上进下出对调十分方便，带刀口引入灭弧装置，带有触电保护器件，也可做到快速转化为刀开关（将熔断器卸下换成刀片），还可安装熔丝监测器，带多种连接端子。有关表面安装技术说明可见本篇第16章。

5.1 母线安装的特点

（1）占用系统最小安装空间，缩小成套装置体积。

（2）灵活性、通用性、可变性，便于维修和工艺的改进，省时、省工、省料。详细资料请参见本篇第16章。

5.2 采用表面安装技术的低压动力配电柜

5.2.1 产品的电气参数、技术性能指标

（1）额定工作电压：交流380V或660V。

（2）额定电流：630A及以下。

（3）辅助电路额定工作电压：交流220V，380V；直流110V，220V。

（4）主母线短时耐受电流：380V（1s）30kA，660V（1s）25kA。

（5）中性母线短时耐受电流：（1s）18kA。

（6）主母线峰值耐受电流：63kA。

（7）控制电动机容量：0.6~35kW。

（8）馈电电路最大额定电流：200A。

（9）柜体防护等级：IP30。

5.2.2 使用范围

（1）周围空气温度不得超过+40℃，而且在24h内平均

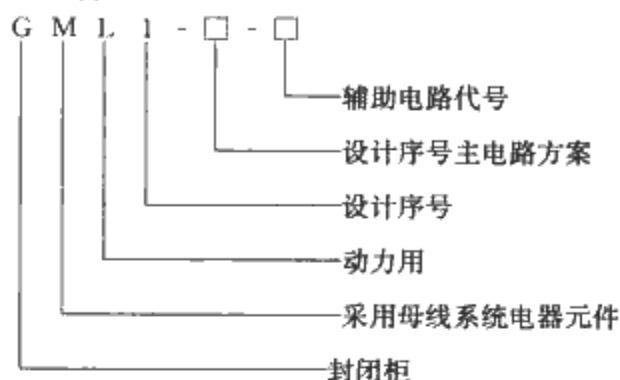
温度不超过+35℃,周围空气温度的下限为-5℃。

(2) 周围空气相对湿度在最高温度为+25℃时,短时可达100%。

(3) 安装场地的海拔高度不得超过2000m。

(4) 设备安装在无振动场所。

5.2.3 型号含义



6 HC-XF 型建筑消防用动力柜

6.1 简述

(1) HC-XF 型建筑消防用动力柜是建筑消防电气成套产品,完全满足建筑规范规定的要求。该产品主要用于消防水泵、喷洒水泵、稳压水泵、正压风机、排烟风机等的供电和控制。适用于各类民用及工业建筑中。该产品是真正意义上的消防专用产品,符合下列标准:

1) GB 7251.1—2005《低压成套开关设备和控制设备》。

2) IEC 60439-1: 2004《低压成套开关设备和控制设备》。

3) GB 50054—2001《低压配电设计规范》。

(2) 对突然停电比过负荷造成的损失要大的线路,其过负荷保护应作用于信号,不能切除电源。

(3) 在 TT 或 TN-S 系统中, N 线上不宜装设电器将 N 线断开,当需要断开 N 线时,应装设相线和 N 线一起切断的保护电器。

(4) 当装设漏电电流动作的保护电器时,应能将其所保护的回路所有带电导线断开。在 TN 系统中当能可靠地保持 N 线为地电位时, N 线可不断开。

(5) 在 TN-C 系统中,严禁断开 PEN 线,不得装设断开 PEN 线的任何电器。当需要在 PEN 线装设电器时,只能相应断开相线回路。

(6) GB 50045—1995《高层民用建筑设计防火规范》中:高层建筑的消防控制室、消防电梯、消防排烟风机等供电,应在最末一级配电箱处设置自动切换装置。

(7) 消防用电设备应采用专用的供电回路,其配电设备应设有明显标志。

(8) GB 50116—1998《火灾自动报警系统设计规范》:

1) 消防控制设备的功能。

2) 控制消防设备的起、停,并应显示其工作状态。

3) 消防水泵、防烟和排烟风机的起、停,除自动控制外,还应能手动直接控制。

4) 显示系统供电的工作状态。

6.2 产品特点

该产品考虑了现行产品规范中相关消防的要求,在电气成套产品的供电和控制系统中,从一次主进线、二次控制回路、柜体结构、元器件选型、二路电源的双电源自动切换等方面,全部按照消防电气成套设备的特殊要求设计和制造,

提高消防供电的可靠性和安全性。该产品区分 TN-S、TT 和 TN-C 系统中控制回路的 N 线和 PEN 线连接方法及开关选用的不同。在末端三相回路中有单相 220V 控制线路的情况下,为保证检修人员的人身安全,TT 系统中的电动机保护开关选用 4P;TN 系统中的电动机保护开关选用 3P。该产品柜体骨架采用特殊型钢材质组装,各功率、控制单元之间采用金属隔板隔成小室,提高供电的可靠性和安全性。

6.2.1 主电路

主电路由塑壳断路器、交流接触器、热继电器组成。塑壳断路器只设瞬动和短延时,其中交流接触器属于不频繁操作器件,其电流略大于电动机额定电流,热继电器按电动机额定电流的 1~1.05 倍设计。

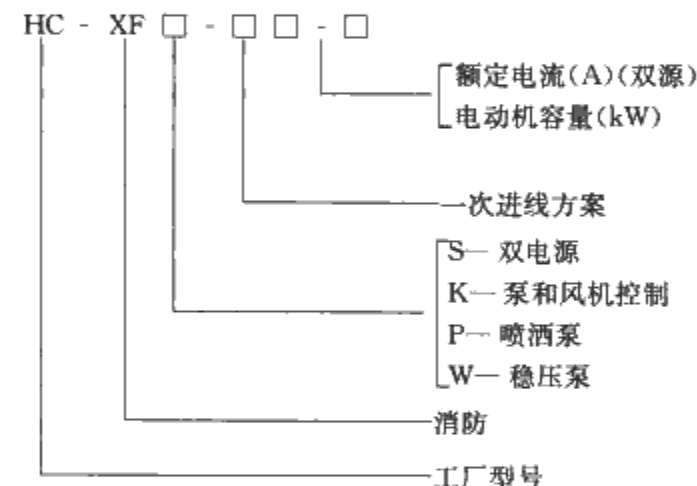
6.2.2 控制回路

控制方式有就地控制、消防中心控制、自动(手动)控制。信号有灯光、声响信号,灯光信号可分为起动运行和故障信号及报警。就地显示和消防中心显示。

有液位控制和压力控制等方案。根据消防水泵不同功能,按不同类型的控制电路、电动机容量、起动方式、备用泵投入方式,组成控制柜。

6.3 产品型号

动力柜型号的含义



6.4 使用环境及技术参数

6.4.1 使用环境

(1) 海拔低于 2000m。

(2) 环境温度小于+40℃,不低于-5℃。

(3) 空气相对湿度在+20℃时小于 90%。

(4) 环境条件:空气中无腐蚀及爆炸气体,无导电尘埃。

6.4.2 技术参数

(1) 额定绝缘电压: 660V AC。

(2) 额定频率: 50Hz, 60Hz。

(3) 额定工作电压: 380V AC。

(4) 控制回路电压: 220V, 24V AC。

(5) 母线额定短时耐受电流: 10kA 有效值 1s。

(6) 母线额定短时耐受峰值电流: 16kA。

(7) 外壳防护等级: IP30、IP54。

6.4.3 柜体结构

6.4.3.1 柜体骨架

柜体骨架采用特殊型钢组装而成。

6.4.3.2 双电源配电柜(SDP)的特征

按 I、II 回路分成两个区,每个区有进线小室和不少于一个回路馈出线小室组成,馈线开关小室按选型的容量不同可以隔成二、三隔小区。左右两侧各设有电缆小室。

6.4.3.3 消防电气控制柜(FC)的特征

一个双电源自动切换(ATS)区;两个消防电气控制区。以上三区均用钢板分隔成小室。消防控制区又可按容量大小用钢板分隔成二回路小室。柜体设计为固定安装方式,也可按用户要求制作为抽出式柜。双电源配电柜母线安装于柜后(N、L1、L2、L3),PE(PEN)线安装于柜体底部。

6.4.3.4 柜体防护等级

用于风机房为IP30,用于水泵房为IP54。用于水泵房的控制柜考虑有加热除湿装置。

6.5 主要方案及元件选用

(1)该产品在元件选用上有多个制造厂家的H级(分断电流30kA)品牌型号,比较灵活,满足多种用户层次的要求。双电源自动切换开关(ATS)选用不带过负荷保护的转换开关,手动切换(机械连锁),自动切换(电气连锁)。

(2)电网—电网互切、电网—发电机互切,智能型具有欠压、过压、缺相、频率异常等自动切换。双电源配电柜选用框架式断路器(短路瞬时)和塑壳式断路器,开关熔断器组选用HH15(QSA)系列。

(3)FC消防控制柜控制电动机的保护开关为塑壳断路器或另配继电器,电流互感器选用体积小的BH型。

(4)电动机需要降压启动时,可选用有Y-△启动、自耦降压启动、软启动,电磁软启动的产品方案,启动装置采用一配一原则。电动机保护开关按照保护系统不同而选择:TT和TT-S系统需要选用4极保护开关;TN-C系统选用3极保护开关。电动机过载发报警信号,故电动机保护开关只设短路保护,不设长延时保护。

(5)一次主进线方案。

1)双电源配电柜。01方案为选择性断路器+刀熔开关;02方案为刀熔开关+刀熔开关正确配合;具有选择性工作状态,不会发生误动作而扩大停电范围。

2)FC消防电气控制柜,每柜均设ATS自动切换开关。30kW及以下全压启动四回路电动机控制选择03方案,控制对象为正压风机、排烟风机、稳压泵、消防泵、喷洒泵;04方案15~132kW全压启动二回路电动机控制,控制对象为消防水泵、喷洒泵;05方案为15~132kW软启动二回路电动机控制,控制对象为正压风机、排烟风机、稳压水泵、消防泵、喷洒泵;06方案为22~75kW Y-△降压启动二回路电动机控制,控制对象为消防水泵、喷洒水泵(包括22kW,30kW正压风机、排烟风机);07方案为22~75kW自耦降压启动二回路电动机控制,控制对象为消防水泵、喷洒水泵(包括22kW,30kW正压风机、排烟风机);08方案为22~75kW电磁软启动二回路电动机控制,控制对象为消防泵、喷洒泵(包括22kW,30kW正压风机、排烟风机)。

(6)二次接线。二次接线是按照建筑消防电气设备工作状况和控制框图及规范规定而设计的,信号电源随电动机主电源失电而切换。控制回路电源为220V,控制回路的电源开关按照工程保护系统的不同而选择不同的开关:TN-S、TT系统选用二极开关;TN-C系统选用单极开关。控制回路采用常用水泵电气控制图集01D303-3(中国建筑研究设计院主编),也可按用户要求的二次回路设计。消火栓箱按钮能显示启动位置,回路电压为交流24V。

6.6 应用举例

该产品实现了规范规定的最末一级(末端)配电箱处自

动切换专用回路供电,从电源、供电回路、电气元器件、消防电气设备等全部为双回路互为备用,使消防电气设备更安全可靠。要特别注意不要把生活用水泵接在消防电气设备双电源供电回路中,否则就失去了消防电气设备的安全可靠性。FC柜的电动机保护依靠断路器,过载信号依靠热继电器。

7 双电源动力柜

双电源动力柜是实现双电源供电并可互为备用的,事故时完成切换动作的低压成套开关设备。作为切换动作的元件有塑壳断路器(MCCB)、接触器、电动隔离开关、微型断路器(MCB)、多功能电器KBO等,常用的是断路器。双电源柜多应用于PC级(动力),在前面消防动力柜中已有叙述,常用于电源出现失压、欠压、缺相、过压的情况和需要备用电源场合,与EPS(应急电源)、UPS一起可形成完整的满足不同负荷需求的稳定电源供电网。适用于消防、高层建筑、邮电、通信、信息设备、化工、煤炭、船舶、军工、工业流水线、交通、医疗等行业。

7.1 双电源切换动力柜主要技术要求

双电源切换动力柜主要技术要求应符合GB 7251.1的技术要求,并附加如下要求:

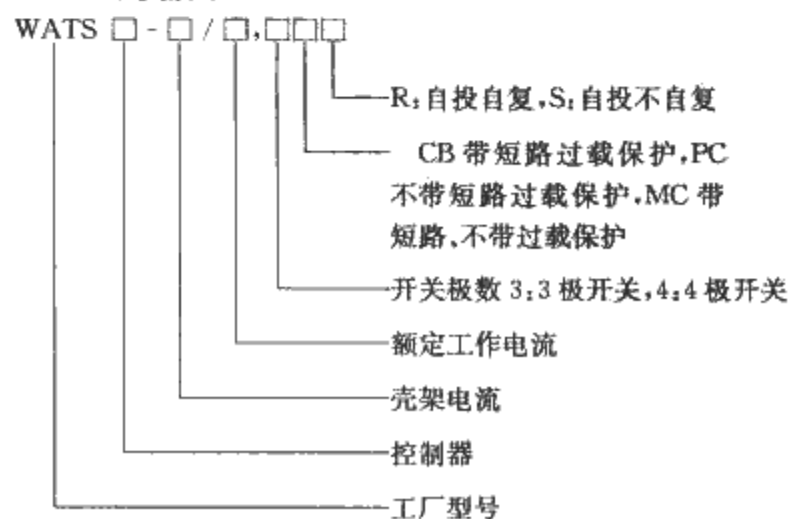
- (1)开关切换采用电驱动,切换平稳可靠,冲击力小、无噪声。
- (2)开关执行部件带热保护(如断路器带热磁保护、电动隔离熔断器组合开关带熔断器保护)。
- (3)带机械连锁,确保可靠地互为备用。
- (4)三种稳定工作状态。状态1:常用电源合,备用电源分;状态2:常用电源分,备用电源合;状态3:常用电源分,备用电源分。
- (5)开关可带负载自动切换。
- (6)根据用户需求,可设失压、欠压、断相、延时、备用发电机启动等保护控制功能。
- (7)结构简单,安装便捷,使用寿命长。
- (8)电流从63~1250A,分3级和4级。

7.2 双电源切换开关技术要求

双电源切换开关是双电源动力柜的主要核心部件,也是双电源动力柜主要性能的技术保证。双电源切换开关要符合其产品的要求,也要符合双电源切换动力柜的要求,两者一致。

7.3 WATS型自动电源切换开关

7.3.1 型号含义



7.3.2 WATS 切换开关选用

WATSB - 100/40, 4 CBR

切换方式可选:
R: 自投自复, S: 自投不自复

执行断路器可选: CB带短路过载保护, PC 不带短路过载保护, MC 带短路、不带过载保护

开关极数可选:
3: 3极开关
4: 4极开关

额定电流可选:
 $I = 63A, 10A, 16A, 20A, 32A, 40A, 5A, 63A$
 $I = 100A, 16A, 20A, 32A, 40A, 50A, 63A, 80A, 100A$
 $I = 225A, 100A, 125A, 160A, 180A, 200A, 225A$
 $I = 400A, 200A, 250A, 315A, 350A, 400A$
 $I = 630A, 400A, 500A, 630A$
 $I = 800A, 630A, 700A, 800A$
 $I = 1250A, 63A, 700A, 80A, 1000A, 1250A$

控制器类型:
A—末端型, 功能是: 手动自动转换、失压保护、延时控制、可另加指令(消防)复位, 适用于电网—电网转换。
B—基本型, 功能是: 手动自动转换、失压、欠压、断相保护、延时控制、可另加指令(消防)复位, 适用于电网—电网转换。
C—发电机型, 功能是: 手动自动转换、失压、欠压、断相保护、延时控制、带启动发电机触点, 适用于电网发电机转换。

7.3.3 工作原理

双电源切换开关的工作原理是: 当常用电源电压正常, 功能键置于自动挡, 控制器将两台断路器分别置于 OR 分、ON 合的状态, 使常用电源接通负载。当常用电源下降到 85% 以下或常用电源的一相或三相中断时, 经过延时将负载从常用电源切换至备用电源, 并在常用电源恢复正常后, 将负载返回接至常用电源。

7.4 SPC100 系列小型自动电源切换开关

简述: SPC100 系列小型自动电源切换开关(见图 3.3-3)是一种小型双电源转换开关。额定电流从 40~100A, 分 3 极和 4 极, 共 8 种规格。

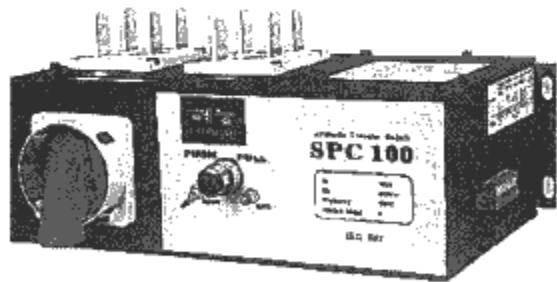
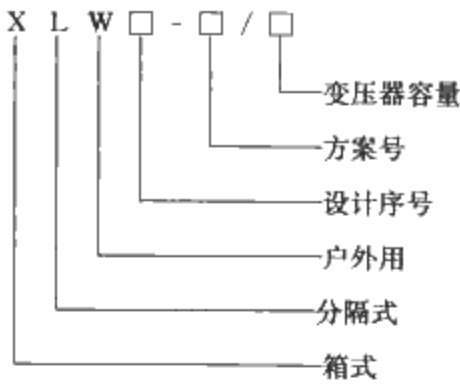


图 3.3-3 SPC100 系列小型自动电源切换开关

8 户外多功能动力柜

户外多功能动力柜是根据国家电网改造计划, 为满足各地供电部门(含农网改造)要求而设计、开发的一种户外多功能配电装置。

8.1 产品型号



8.2 主要技术参数

- (1) 额定电压为 220V, 400V。
- (2) 额定绝缘电压为 690V。
- (3) 额定频率为 50Hz。
- (4) 变压器容量最大至 250kVA。
- (5) 供电接线为三相四线制。
- (6) 额定短时耐受电流为 10kA。
- (7) 防护等级 IP43。

8.3 产品结构

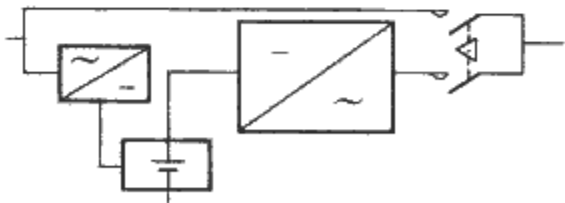
产品结构为箱式, 由优质钢板焊接而成, 有足够的机械强度, 设有通风孔, 与一般动力柜不同的是:

- (1) 装置防护等级不低于 IP43。
- (2) 内部结构部件及紧固件硬座镀锌处理(镀锌厚度不低于 12μm)。
- (3) 装置内部各系统单元之间采用结构隔离形式, 计量室单独设置。
- (4) 指示仪表设在内部, 通常在外壳上设观察窗, 可现场观察到仪表状态。
- (5) 装置外露的铭牌需用黄铜材料制作。
- (6) 装置安装高度: 距地面 1500mm 以上。

9 应急电源设备(EPS)

9.1 简述

应急电源(EPS)是在建筑工程、消防工程或其他工程中为特殊负载工作时预备的一种应急使用的电源设备。本产品应符合 GB 17945—2000《消防应急电源》的要求。它的一般原理如图 3.3-4 所示, 它与图 3.3-5 所示的不停电电源(UPS)的最大区别是: 应急电源向负载正常供电的路径是由商业用电直接向负载供电, 不停电电源向负载正常供电的路径是由商业用电经整流器—逆变器路径供电。应急电源在紧急工况下商业用电不正常, 改由蓄电池通过逆变器向负载供电。



应急时直-交逆变供电

图 3.3-4 应急电源(EPS)

应急电源(EPS)的蓄能部件——蓄电池, 平时不向负载提供电能, 但它要接受商用交流电源通过整流器的浮充

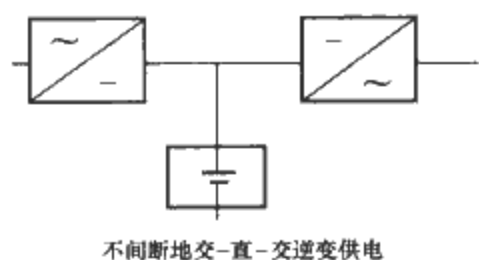


图 3.3-5 不停电电源 (UPS)

电。在紧急工况下，由蓄电池通过直流—交流的逆变器向负载提供电能。

应急电源设备 (EPS) 应用的最多领域为建筑行业，当建筑物发生火灾或其他紧急情况时作为应急照明向各种灯具 (含单进单出型金属卤素灯、钠灯) 提供集中供电的电源。

9.2 分类

应急电源设备 (EPS) 的分类通常按输出电源制式、结构、应用线路接线方式、采用电力电子元件、有智能化和通信等来区分。

(1) 电源制式。单相、三相。

(2) 结构。挂式、嵌式、落地式。

(3) 应用线路接线方式。单电源，双电源，单相单输入多回路输出，单相双输入多回路输出，单相三输入三相输出，单相双输入双输出现场控制，三相输入三相输出应急时单相三路输出，三相多路输入三相多路输出应急时单相多路输出，单相双输入单相输出供多层接线，应急照明混合接线双电源，第二回路电源双回路等。

(4) 采用电力电子元件。采用大功率晶体管，IGBT 等。

(5) 是否有智能化和通信功能。

9.3 应急电源 (EPS) 工作原理和主要技术参数

9.3.1 应急电源 (EPS) 工作原理

下面分别按线路的不同叙述工作原理。

9.3.1.1 充当备用电源的双回路

此时对负载 EPS 可充当备用电源，并可在末端互投。当有市电时逆变器不工作，EPS 无输出。当无市电时 (需要应急电源时)，逆变器工作并通过负载侧的切换开关向负载供电。

9.3.1.2 双电源

在正常情况下，市电通过 KM1、KM2 输出，同时充电器对蓄电池充电。市电停电时，备用电通过 KM3、KM1 输出。当市电和备用电同时停电时，控制器发指令，逆变器工作并通过 KM1 切换应急电源 (EPS) 输出供点给负载。当备用电延时投入，应急电源 (EPS) 先投入，待备用电来电时，再切换为备用电。此时是应急电源 (EPS) 对双电源同为备用。应急电源 (EPS) 充当第三电源在电源末端进行互投切换。

9.3.1.3 单电源

单电源有市电时，市电通过 KM1 输出，同时充电器对蓄电池充电。在控制器监测到市电停电 (或电压过低) 时，逆变器工作将 KM1 切换至应急电源输出。单电源有两路市电，其中一路用外部开关 K 控制，并用 KM1 接入负载，当检测到市电停电时外部开关 K 任何位置，均能实现应急电源向负载供电。

9.3.2 应急电源 (EPS) 主要技术参数

应急电源 (EPS) 主要技术参数包括输入输出参数 (额定电压、电流、频率)、应急供电时间、切换时间、超载能

力、适用负载、输出回路数、环境温度、相对湿度、海拔高度、噪声、波形等。

10 智能功率电子开关

10.1 智能功率电子开关安装条件尽可能接近正常使用条件

智能功率电子开关，简称电子开关，它是使用功率半导体器件晶闸管式电子开关来代替传统的有触点控制器件装置。与传统接触器、热继电器、断路器系统相比，没有触头及可动作机械机构，不存在电弧、触头磨损和熔焊等问题，提高用电质量和用电保护、控制的可靠性。早期的功率电子开关比较简单，只是用晶闸管的开通与关断来代替接触器的开通与关断，控制电路仅为晶闸管提供触发信号，为简单的保护，因此也将它称作无触点开关。现代的功率电子开关的控制电路采用了单片机，增加了控制和保护功能，与传统的无触点开关相比有了质的飞跃。图 3.3-6 所示为智能功率电子开关的原理结构图。

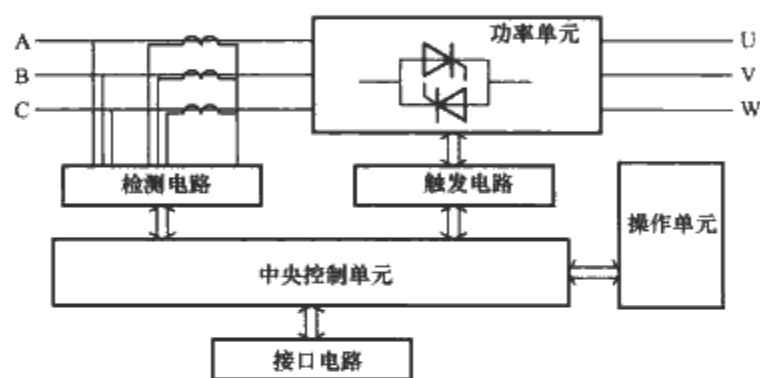


图 3.3-6 智能功率电子开关原理结构图

图 3.3-6 中，功率单元就是功率电子器件晶闸管组成的控制电路开通/关断的电子开关，它相当于接触器的触头，中央控制单元的主体是单片机或 DSP，是使电子开关智能化的核心，它承担着参数运算、保护监测、信息记录、开通/关断控制等工作。检测电路负责将工作状态信息检测出来送中央控制单元，操作单元负责人机对话，接口电路负责本装置与其他装置之间的联系。功率电子开关可制成单元 (抽屉) 式，也可以制成箱式、柜式。

10.2 智能功率电子开关的功能及参数

智能功率电子开关有基本型、可逆型、多功能型。

基本型相当于单接触器式电路，可以控制电动机的运行与停止。

可逆型相当于由两个接触器组成的可逆电路，可以控制电动机的正、反转运行与停止。

多功能型除可控制电动机正、反转运行与停止外，还可以选择带有制动功能、闭环控制功能等，可以控制电动机的快速准确停车。

作为智能型电子开关，其功能还有：电动机无冲击变压起动功能，可选择的电动机停车方式，可选择的反馈方式，电动机过电流保护，电流反时限保护，电动机堵转保护，过电压保护，电压不平衡保护，缺相保护，温度保护，错误操作保护，可调的无冲击变压起动时间，可调的制动时间等。

智能功率电子开关的主要参数有：

(1) 额定电流。电动机连续稳定运行时的电流，通常情况下该电流是电动机的额定电流。

- (2) 最大电流。电动机在起动时的最大电流不能超过该值。
- (3) 额定电压。装置的工作电压，该电压要与电动机的额定电压相匹配。
- (4) 额定频率。装置工作电源的频率，与电动机的要求相匹配。
- (5) 软起时间。装置的最大可调无冲击变压起动时间，应略大于负载要求的起动时间。
- (6) 制动时间。装置的最大可调制动时间，应略大于电动机允许的制动时间。

10.3 智能功率电子开关的使用

智能功率电子开关可以代替接触器在各种交流电路中使用，如在电动机控制电路中控制电动机的起动/停止、正/反转等。典型应用电路如图 3.3-7 所示。

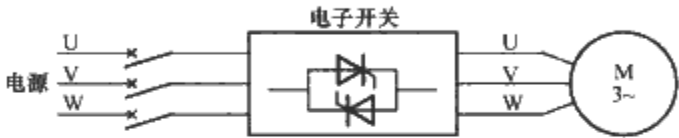


图 3.3-7 智能功率电子开关的典型应用电路

智能功率电子开关也可以接成其他电路形式，见图 3.3-8~图 3.3-10。

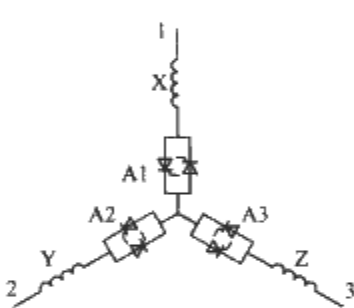


图 3.3-8 装置在电动机尾端星接

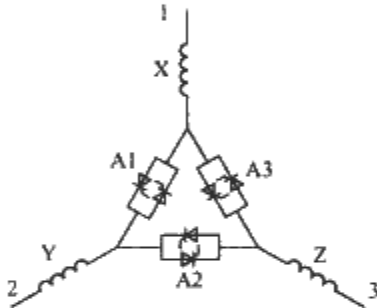


图 3.3-9 装置在电动机尾端角接

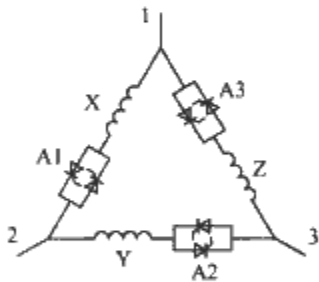


图 3.3-10 共三角形接法

应注意的是：在需要制动功能的情况下，电子开关与电动机只能使用典型接线方式进行连接。

10.4 智能功率电子开关的选型计算

对于单方向运行的电动机，可以选择基本型装置；需要正反转运行的电动机，可以选择可逆型；对需要制动和速度闭环的系统，可以选择多功能型。

智能功率电子开关的选型计算，主要依据是电动机的额定电流及其起动电流倍数。电动机在起动时，电路的最大电流一定要限制在装置的最大允许电流以内，否则将会对电子开关造成损坏。

标准电子开关的起动电流是按照笼型异步电动机额定电流的 7 倍，绕线异步电动机额定电流的 5 倍设计的，如要求超出了标准设计，请与制造厂联系确定选型。

例 1：有一组 22kW 笼型异步电动机，要求具有正反转

和能耗制动功能。电动机起动电流倍数为额定电流 7 倍，则起动电流约 280A，可选择 AES70-300DN3/0000 或 AES70-300DN1/0000 型智能功率电子开关。

例 2：有一组 22kW 绕线异步电动机，起动电流倍数为 5 倍，则起动电流约 200A，可选择 AES70-200 型智能功率电子开关。

对于海拔高度超过 1000m 或环境温度超过 40℃ 的场合，还要进行降容估算。

不同厂家的产品，不同的设计，降容系数是不同的，在制造商没有给出降容系数时，可参见图 3.3-11 和图 3.3-12 进行降容估算。

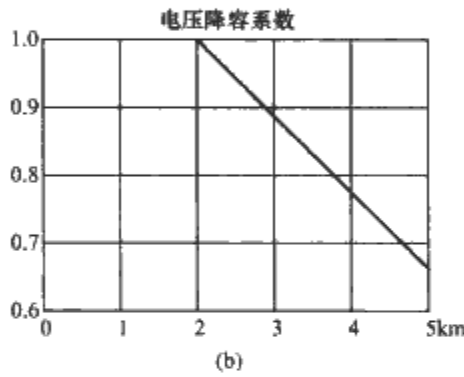
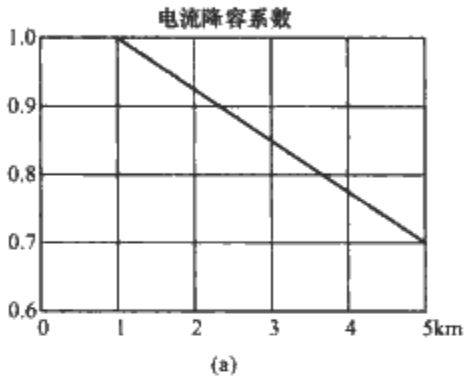


图 3.3-11 海拔高度降容系数
(a) 电流降容系数；(b) 电压降容系数

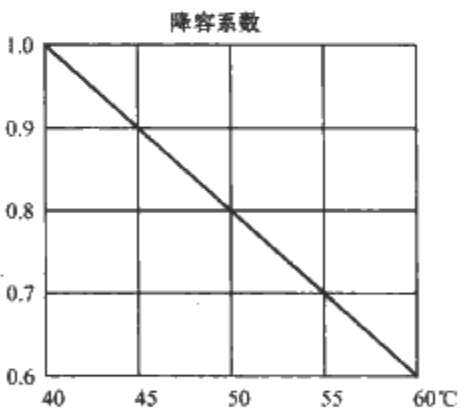


图 3.3-12 温度降容系数

从图 3.3-11 中可以看到，在海拔超过 1000m 时，装置的电流就要降容；海拔超过 2000m 时，在装置电流降容的同时，装置的电压也要降容。图 3.3-12 所示为在环境温度超过 40℃ 时，装置的降容系数。

例 3：在海拔高度为 1500m 的地方，电压不需降容，电流降容系数约为 0.95。一台 800A 的装置，在这个高度时允许的使用电流 $I=800 \times 0.95A=760A$ 。

若在海拔高度为 3000m 的地方，电流降容系数约为 0.84，电压降容系数为 0.9。一台 380V/800A 的装置，在这个高度时允许的使用电流 $I=800 \times 0.84A=672A$ ，而允许的使用电压 $U=380 \times 0.9V=342V$ 。

10.5 智能功率电子开关典型产品

10.5.1 简介

AES-70 型智能功率电子开关,适用于冶金、矿山、石油、化工、纺织等行业中需要频繁起动、频繁制动和可逆运行的电力拖动系统。尤其适用于钢厂轧钢机和热处理炉等设备中交流电动机的控制开关,也可用作其他工矿企业电力拖动系统中可逆运行的三相绕线转子和笼型异步电动机的控制开关。

AES-70 系列智能功率电子开关,其核心技术采用了先进的电动机控制专用芯片—美国德克萨斯州仪器公司生产的 TMS320F240 数字信号处理器,确保运算精确、响应迅速、控制特性优异、可靠性高。主电路的功率器件采用晶闸管模块,结构先进、轻巧、合理,方便使用和维护。AES-70 系列产品将交流电动机的控制、操作、显示、连锁、故障保护集于一身,真正做到了全数字化、无触点。极大地简化了电路,提高了产品的可靠性。网络通信能方便地实现遥控、连锁、PLC 程序控制等功能。

AES-70 系列智能功率电子开关结构灵活,可以提供抽屉式(提供抽屉柜),也可以提供控制箱式(可壁挂或装于控制柜内)。装置外形轻巧,比传统的模拟式电子开关质量减轻了三分之一。将散热风机安装于抽屉内,取消了传统的风机抽屉,提高了单位面积的带载能力。使用方便,通过面板按键对系统运行所需的参数进行设定、修改。数码管显示各设定的参数、检测参数、故障信息,使用方便且直观明确。起动灵活,可全压起动或软起动,以适应不同场合、不同负载的需要。制动可靠,制动电压和制动时间连续可调,制动类型有反接制动和直流能耗制动。保护功能齐全,系统具备完善的保护功能,不仅能保护装置本身,而且具有全面完备的电动机保护功能。

智能功率电子开关是按照 IEC 60158-2、GB 3797 设计制造的。

智能功率电子开关可广泛应用于需频繁正、反转,起、制动的交流异步电动机,适用于单机和成组电动机的传动。可全压起动或软起动,是替代模拟式电子开关或交流接触器的理想换代产品。

10.5.2 技术数据

AES-70 型智能功率电子开关技术数据见表 3.3-1。

表 3.3-1 AES-70 型智能功率电子开关技术数据

产品型号 AES-70-		200	300	500	600	800	900	1000
最大工作电流/ 每台装置(A)		210	320	530	640	800	900	1000
推荐电动机 (单机)	笼型 (按 7 倍计)	15	22	37	45	55	65	75
	绕线型 (按 5 倍计)	22	32	55	60	75	90	100
工作频率范围 (Hz)		50±10%						
工作电压范围 (V)		380±10%						
软起动时间 (s)		0.1~10						
直流制动时间 (s)		0.01~10						

续表							
产品型号 AES-70-	200	300	500	600	800	900	1000
保护动作时间	过电流（20ms）、欠电压（200ms）、电动机堵转（10s）、散热器过热（20ms）、外部报警（20ms）、三相不平衡（200ms）等						
输入/出信号	输入为开关量；输出每路100mA，24V。						
环境温度（℃）	0～+40						
振动	小于0.6G						
冷却形式	风冷或自冷						
环境湿度	空气最大相对湿度不超过90%（20℃），无凝露						
安装场所	室内，海拔低于2000m（1000m以上应降容），无腐蚀性气体						
外形结构	700mm×800mm×2200mm 抽屉柜（最多装5个抽屉） 控制箱（可配控制柜，最多装4个控制箱）						

10.5.3 端子及功能

端子及功能见表 3.3-2。

表 3.3-2 端子及功能

功 能		端子名	说 明
主电路	连接三相供电电源	U、V、W	参见技术数据
	连接三相电动机	R、S、T	
	电子开关外壳接地端	GND(PE)	
控制电源	交流电源输入(U相)	J0-1	380V AC
	交流电源输入(V相)	J0-3	380V AC
	接地线	J0-5	
电压检测	U相电压	J201-1	380V AC
	V相电压	J201-3	380V AC
	W相电压	J201-5	380V AC
电流检测输入	U相电流	J202-1	TA-1
	GND	J202-2	TA-2
	V相电流	J202-3	TB-1
	GND	J202-4	TB-2
	W相电流	J202-5	TC-1
	GND	J202-6	TC-2
脉冲控制输入	正向 U 相控制脉冲	J203	X14
	正向 V 相控制脉冲	J204	X36
	正向 W 相控制脉冲	J205	X52
	反向 U 相控制脉冲	J206	X1'4'
	反向 W 相控制脉冲	J207	X5'2'
	能耗控制脉冲	J208	续流二极管
控制电路输入信号	热继电器过热输入	J1-1	ON:散热器过热,OFF:正常
	FWD 正转命令	J1-3	ON:正转,OFF:减速停止
	REV 反转命令	J1-7	ON:反转,OFF:减速停止
	RES 复位	J1-9	ON:故障保护复位
	外部连锁输入	J1-11	屏蔽 P30,P29 详见参数说明
	备用	J1-13	
	输入信号公共端	J1-15	控制电路公共端(N或M)
控制电路输出信号	输出信号公共端	J2-1	P24 控制电路公共端
	正转指示输出	J2-3	ON=正转
	故障指示输出	J2-5	ON=故障
	反转指示输出	J2-7	ON=反转
	制动指示输出	J2-9	ON=制动
模拟输出	电流指示	J5-1	外接模拟电流表(0~10A)
	GND	J5-3	基准电位

续表

功 能		端子名	说 明
软 起 动	起动时间		P11 详见参数说明
	起动电压相对值		P12 详见参数说明
制 动	自由停车		设定 P3、P17 详见参数说明
	反接制动		设定 P30、P17、P15、P16 详见参数说明
	能耗制动		设定 P30、P17、P27、P28 详见参数说明
	反接+能耗制动		设定 P30、P17、P27、P28 详见参数说明

10.5.4 选型时应提供的信息

选型时应提供如下信息：

电动机额定功率（kW 或 HP）。

电动机额定电流（A）。

电动机额定电压（V）。

电动机同步转速（r/min）。

负载类型（泵、压缩机、传送带等）。

环境温度。

第4章 母线干线系统（母线槽）

1 简述

母线干线系统简称母线槽。该系统由母线、母线支撑件和绝缘件、外壳、某些固定件及与其他单元相接的连接件构成，这些母线置于走线槽或类似的壳体中，并由绝缘材料支撑或隔开。主要用于化工、冶金、机械、文化体育场馆、展览馆、档案馆、博物馆、机场、车站以及高层建筑的输配电系统等。母线槽的主要技术要求依据 GB 7251.2—2006《低压成套开关设备和控制设备 第2部分：对母线干线系统（母线槽）的特殊要求》。

2 术语和定义

2.1 母线干线单元

由母线、母线支撑件和绝缘件、外壳、某些固定件及与其他单元相接的连接件组成。它可具有分接装置也可无分接装置；干线系统的单元有不同的几何形状，例如：直形、肘形（单弯或双弯）、T形和十字形。

2.2 带母线分接装置的母线干线单元

由制造商预先制造成可在一点或多点安装分接单元的母线干线单元。分接单元连接到母线干线单元时，可要求也可不要求母线系统与电源断开。

2.3 滑出式分接母线干线单元

允许使用滚轮型或滑触型分接单元的母线干线单元。

2.4 母线干线变容单元

用于连接同一系统中不同型号或不同额定电流的两种单元的母线干线单元。

2.5 母线干线热膨胀单元

允许母线由于系统的热膨胀在轴向有一定移动量的母线干线单元。

2.6 母线换相单元

用于改变相导体的相应位置以平衡电抗或改变相的排列位置的一种母线干线单元（如排列为 L1-L2-L3-N 的系统转换成排列为 N-L3-L2-L1 的系统）。

2.7 母线干线弯曲单元

导体和外壳设计成安装时可以转换方向的一种母线干线单元。

2.8 母线干线馈电单元

用作任何进线单元的母线干线单元。该单元与电源连接时可要求或不要求电源断开。

2.9 分接单元

用于从带分接装置的母线干线单元中分接出电源的一种

输出装置。如滚轮装置、滑触装置或插入装置，分接单元可以是部分型式试验成套设备；分接单元可以永久连接，而且可以用于一个或任何电源、通信或控制电路的组合装置连接；分接单元可带有附件，如保护器件（熔断器、熔断开关、开关熔断器、断路器、剩余电流断路器），通信或遥控电子设备接触器，接线插座和连接器件（预制线螺钉型或非螺钉型端子）等。

2.10 用于建筑移动结构的母线干线单元

一种允许建筑物由于热膨胀和收缩而移动的母线干线单元。

2.11 母线干线火焰挡板单元

火焰条件下，在规定时间内防止火焰蔓延的一种带或不带附加部件的母线干线单元或其一部分。

2.12 母线干线耐火单元

火焰条件下，用于在规定时间内保持电路完整性的一种带或不带附加部件的母线干线单元或其一部分。

3 母线干线系统（母线槽）产品

按其结构形式、外壳形式以及使用场合可分为：密集型母线槽（见图 3.4-1），空气型母线槽（见图 3.4-2），外壳有钢制、铝合金压铸制防火型母线槽（见图 3.4-3），照明用母线槽（见图 3.4-4），插接母线槽（见图 3.4-5），BM1 型保护式母线槽（见图 3.4-6）。

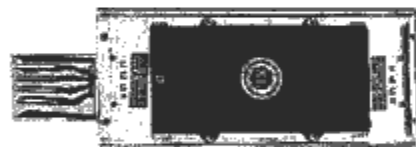


图 3.4-1 密集型母线槽

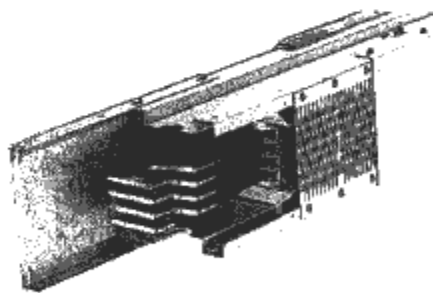


图 3.4-2 空气型母线槽

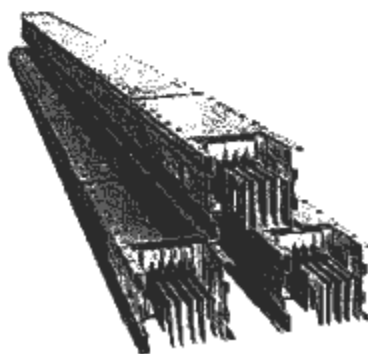


图 3.4-3 防火型母线槽

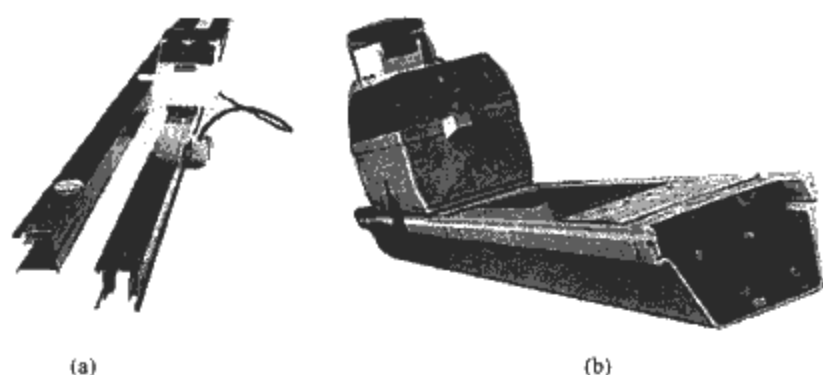


图 3.4-4 照明用母线槽
(a) CD 型照明母线槽; (b) BDO 型空气照明母线槽

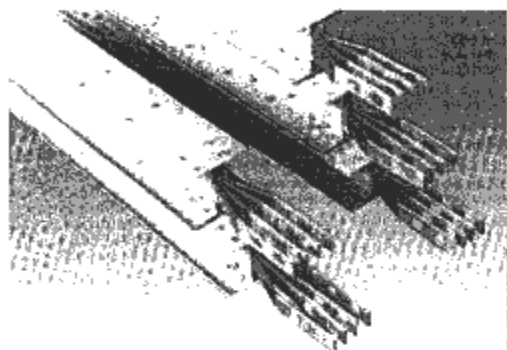


图 3.4-5 插接母线槽

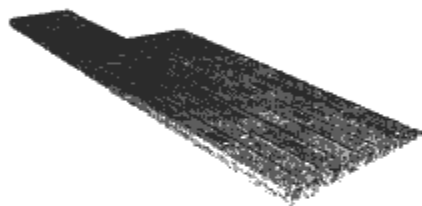
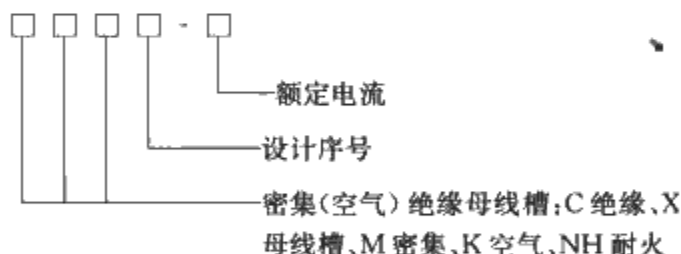


图 3.4-6 保护式母线槽

4 主要技术要求

4.1 产品型号及含义



4.2 正常使用环境条件

4.2.1 周围空气温度

(1) 户内成套设备的周围空气温度。周围空气温度不得超过+40℃, 而且在 24h 内其平均温度不超过+35℃。周围空气温度的下限为-5℃。

(2) 户外成套设备的周围空气温度。周围空气温度不得超过+40℃, 而且在 24h 内其平均温度不超过+35℃。周围空气温度的下限为: 温带地区为-25℃; 严寒地区为-50℃。在严寒地区使用成套设备, 制造商与用户之间需要达成一个专门的协议。

(3) 母线槽的制造商应给出在 35℃ 基准周围空气温度时的母线干线系统的额定电流。如适用, 制造商应给出额定系数 (35℃ 时 $K_1=1$) 以便根据安装条件的温度范围确定系统的允许电流 ($I=K_1 I_N$)。

4.2.2 大气条件

(1) 户内成套设备的大气条件。空气清洁, 在最高温度

为+40℃ 时, 其相对湿度不得超过 50%。在较低温度时, 允许有较大的相对湿度。例如: +20℃ 时相对湿度为 90%。但应考虑到由于温度的变化, 有可能会偶尔产生适度的凝露。

(2) 户外成套设备的大气条件。最高温度为+25℃ 时, 相对湿度短时可高达 100%。

4.2.3 特殊使用条件

(1) 母线干线系统安装条件。如果一条母线干线系统可以在不同的安装条件下使用 (如导体方位的改变), 根据本篇第 3 章, 制造商应给出相应的安装系数 (K_2) (如果有的话), 以确定系统最后允许电流 $I=K_1 K_2 I_N$ 。

(2) 工频磁场。在某些安装条件下, 可能需要了解母线干线周围的工频磁场强度 (如: 高速数据网站、辐射设备、工作站监控器等)。

母线干线周围磁场强度的测量和计算方法在附录 K 中给出。

4.3 电气性能

4.3.1 成套设备的电气性能

母线干线系统作为低压成套开关设备的一部分, 应具备的电气性能是:

- (1) 额定电压 (U_N)。
- (2) 额定电流 (I_N)。
- (3) 额定短时耐受电流 (I_{cw})。
- (4) 额定峰值耐受电流 (I_{pk})。
- (5) 额定限制短路电流 (I_{cc})。
- (6) 额定熔断短路电流 (I_{ef})。
- (7) 额定分散系数。
- (8) 额定频率。

4.3.2 母线干线系统的电气性能

(1) 系统的电阻、电抗和阻抗值。

1) 每米相导体平均电阻值。

a. R_{20} , 在温度为+20℃ 时的电阻值。

b. R_1 , 在额定电流 I_N 、稳定状态下工作温度为 θ_1 时的电阻值。

2) 每米相导体平均电抗值。 X_1 , 在额定电流 I_N 、额定频率为 f_N 时的电抗值。

3) 每米相导体平均阻抗值。 Z_1 , 在稳定状态下工作温度为 θ_1 时的阻抗值。

(2) 故障条件下系统的电阻、电抗和阻抗值。下面规定了使用约定电流大于 100A 的母线干线系统。为了计算母线干线系统中每个电气装点的短路电流和故障电流, 便给出故障回路阻抗值。下面任何一种方法可用作这类故障电流的计算:

1) 对称法 (见 IEC 60909: 1998)。在温度为+20℃ 时考虑每米导体的零序阻抗:

- a. Z_{0phN} , 相对 N。
- b. Z_{0phPEN} , 相对 PEN。
- c. Z_{0phPE} , 相对 PE。

2) 阻抗法。在温度为+20℃ 时考虑每米导体的平均电阻:

- a. R_{bophph} , 相对相。
- c. R_{bophN} , 相对 N。
- c. $R_{bophPEN}$, 相对 PEN。
- d. R_{bophPE} , 相对 PE。

在系统稳定状态下工作温度为 θ_1 、额定电流 I_N 时考虑

每米导体的平均电阻：

- a. R_{bophph} ，相对相。
- b. R_{bophN} ，相对 N。
- c. $R_{bophPEN}$ ，相对 PEN。
- d. R_{bophPE} ，相对 PE。

额定频率为 F ，额定电流 I_N 时考虑每米导体的平均阻抗：

- a. R_{bophph} ，相对相。
- b. R_{bophN} ，相对 N。
- c. $R_{bophPEN}$ ，相对 PEN。
- d. R_{bophPE} ，相对 PE。

(3) 用测量计算方法确定母线干线系统的电气性能见第 6 篇。

4.4 母线槽的结构

4.4.1 母线槽的设计与结构

(1) 母线干线系统的结构依母线槽的产品类型不同而不同，母线槽结构对比见表 3.4-1。

表 3.4-1 母线槽结构对比

铜排绝缘方式	代表型号	结构特点
密集绝缘	CMC6 CMC-B CCX8	母线槽的导电裸铜排用绝缘材料（等级为 B 级的绝缘套管）包扎后，紧密地夹装在母线槽的壳体内。母线间紧密压紧无间隙，靠压紧的母线及壳体之间传热、散热
空气绝缘	CKC6 CKX8	母线槽的导电裸铜排用绝缘衬垫支撑在母线槽的壳体内，靠空气介质来绝缘。在母线间留有空隙，依空隙中的空气流动进行散热
空气附加绝缘	CCKX8	在一般的空气型母线槽的裸导电铜排外，加装绝缘层后，再用绝缘衬垫支撑在母线槽的壳体内

(2) 母线干线系统应按型式试验成套设备（TTA）进行设计。结构设计的要求是（引自 GB 7251.2—2006 的 7.1.1 条）：

- 1) 正常机械负载。对母线干线系统，正常机械负载除包括本身的质量外还包括馈电单元的机械负载。
 - a. 所需机械刚度可通过选择材料的厚度、形状来获得和/或通过制造商规定的固定点的数量和位置来获得。
 - b. 由自身单独支架支撑的馈电单元，不包括在正常机械负载中。
- 2) 重载机械负载。对母线干线系统，重载机械负载除包括正常机械负载外，还包括如一个人（90kg）的质量这样的额定负载。
 - a. 所需机械刚度可通过选择材料的厚度、形状来获得和/或通过制造商规定的固定点的数量和位置来获得。
 - b. 本条不包括可作为行走通道使用的母线干线系统。
- 3) 特殊机械负载。母线干线系统承受其他附加负载的能力（如照明设备、附加电缆、梯子等），应由制造商和用户之间协商。
- 4) 绝缘材料对非正常发热的耐受性。母线干线系统绝缘材料的部件可能处于热应力作用下，不应受非正常发热的过度影响，其热应力是由电气作用和可能损坏系统安全的变形引起的。
- 5) 耐受火焰蔓延。当燃烧移开后，母线干线系统应无

火焰蔓延或点燃后不再继续燃烧。

6) 母线干线防火板单元。如果母线干线系统水平或垂直通过建筑隔断（如墙和地板），母线干线防火板单元的设计应在着火时防止火焰蔓延。

7) 着火时保持电路的完整性。耐火母线干线单元的设计应在着火时，在规定的时间内能维持配电电路的完整性。

8) 电气间隙。如果母线干线系统按照制造商的说明正确组装，并如同正常使用一样安装好，应按照 GB 7251.1—2005 表 G.1 中过电压类别和最大对地额定工作电压来确定电气间隙以耐受由制造商给出的冲击电压。制造商无其他规定，系统电气间隙的确定应根据：

- a. 过电压类别：Ⅳ（电源进线点）或Ⅲ（配电电路水平）。
- b. 污染等级：3。

对于基础绝缘和功能绝缘电气间隙值是按照 GB 7251.1—2005 表 14 中 A 的情况。辅助绝缘电气间隙值不低于基础绝缘所规定的值。为加强绝缘确定电气间隙时，其额定冲击电压要比基础绝缘规定的电压高一级。带双绝缘的系统部件，即基础绝缘和辅助绝缘不能分开进行试验的按加强绝缘考虑。

9) 爬电距离。如果母线干线系统按照制造商的说明正确组装，并如同正常使用一样安装好，考虑制造商给出的系统额定绝缘电压，确定爬电距离。

对于基础绝缘和功能绝缘电气间隙值是按照 GB 7251.1—2005 表 16 中污染等级和所用绝缘部件的材料组别确定。辅助绝缘爬电距离值不低于基础绝缘规定值。加强绝缘爬电距离值的额定绝缘电压值为基础绝缘额定绝缘电压值的两倍。双绝缘的爬电距离值是构成双绝缘系统的基础绝缘和辅助绝缘的和。

10) 对正确连接分接单元的要求。当已带有分接装置的母线干线系统具有一个保护导体或一个中性导体，或两者兼有时，考虑到安全，它的设计应防止系统中任何部件的不恰当安装或分接单元的不恰当连接。在直流或单相交流的情况下，极的顺序在整个系统中要保持一致。

11) 对带几条电路的母线干线的要求。当带或不带分接装置的一条母线干线系统要在同一槽中安装几条电路时（如不同电源电路、通信和数据传输、超低压电路），系统的设计与结构应能避免任何电路之间的破裂、损坏和错误连接引起的危险。在同一槽中的不同电路最好设计成物理隔离的。如果不能实现这一要求，每条电路应与其他电路隔离或与带或不带接地保护导体的金属部件隔离，系统中任何部件的最高额定绝缘电压由制造商给出。

低压电路和超低压通信电路之间的双绝缘系统可按照某些数据传输标准的要求。

12) 温升。在 GB 7251.1—2005 表 2 中给出的温升限值，同样也适用于母线系统：内装元件的温升由元件决定；用于连接外部的绝缘端子为 70K；母线和导线连接到母线上的可移式部件和插接式触点的温升与电材料、机械强度、相邻设备的影响、与导体接触的绝缘材料的允许温升极限、导体温度对相连元件的影响、接插式触点接触材料表面有关，温升将由它们决定。除非另有规定，对于正常工作时可接近但不需接触如母线干线系统的外壳，金属的表面允许温升限值提高为 25K，绝缘表面允许温升限值为 25K，对正常工作时可接近但不需接触的母线干线系统的外壳金属表面允许温升限值提高 25K，绝缘表面提高 15K。实际中要注意，母线干线系统应根据导线规格和保护器件类型（如 1.30 倍的断

路器电流型定值，约定时间 2h，见 GB 14048.2）设计成能耐受使用中可能发生的过载情况。

13) 直接接触的防护。在 GB 7251.1 中给出的规定适用于母线槽。此外，用或不用绝缘材料制作的能安全防护电击的覆板或部件，应有足够的机械强度耐受正常使用中发生的应力。

14) 在带有滑触分接装置的母线干线系统中，特别是当固定单元的外壳作为装置的保护电路部件时，应采取结构保护措施以保证在分接单元裸导体部件和干线系统中固定的裸导电部件之间有良好的和永久的导电性。

15) 可接近性。必须在成套设备内进行调整和复位的元件应是易于接近的。一般来讲，对于地面安装的设备，由操作人员观察的指示仪表不应安装在高于成套设备基础面 2m 处。将作器件，如手柄、按钮等，应安装在易于操作的高度，这就是说安装在可以满足关于可接近性的要求和操作高度的位置上。

4.4.2 母线干线功能单元

母线干线系统（母线槽）在实际使用时，为了使用方便，根据建筑布局、分线、穿墙、馈电、方便安装等需要，在制造厂预制出许多母线干线功能单元。下面以 CMC-B 密集绝缘母线槽为例，分项叙述这些功能单元。各类功能单元的尺寸随着型号不同也不同，这里给出的仅是相对 CMC-B 密集绝缘母线槽的尺寸，仅供参考。

4.4.2.1 直通单元

直通单元如图 3.4-7 所示，规格参数如表 3.4-2 所示。

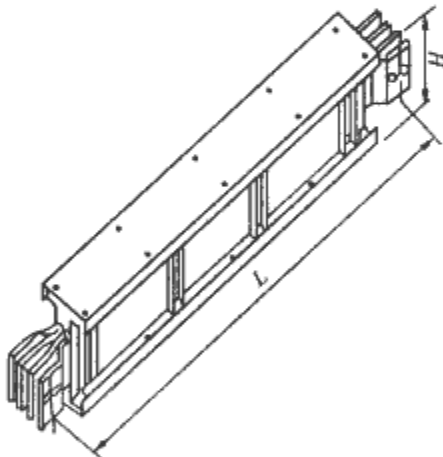


图 3.4-7 直通单元

表 3.4-2 CMC-B 密集绝缘母线槽直通单元规格

型 号	额定电 流(A)	H (mm)	Ⅲ线制质 量(kg/m)	Ⅳ线制质 量(kg/m)	V线制质 量(kg/m)
CMC-B-A-010	100	90	15	17	18
CMC-B-A-025	250	100	16	18	19
CMC-B-A-040	400	100	18	21	22
CMC-B-A-063	630	110	20	23	24
CMC-B-A-080	800	120	22	25	26
CMC-B-A-100	1000	140	26	30	31
CMC-B-A-125	1250	160	28	39	40
CMC-B-A-160	1600	210	33	51	57
CMC-B-A-200	2000	260	56	63	81
CMC-B-A-250	2500	310	67	73	96
CMC-B-A-315	3150	390	84	98	118
CMC-B-A-400	4000	490	94	126	134
CMC-B-A-500	5000	630	130	161	175

4.4.2.2 带插孔直通母线

带插孔直通母线如图 3.4-8 所示，规格参数如表 3.4-3 所示。

表 3.4-3 CMC-B 密集绝缘母线槽带插孔直通单元规格

型号	L (mm)	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	结构
CMC-B-A1	1500	—	750	一组插孔
CMC-B-A2	2000	600	700	二组插孔
CMC-B-A3	3000	800	700	三组插孔

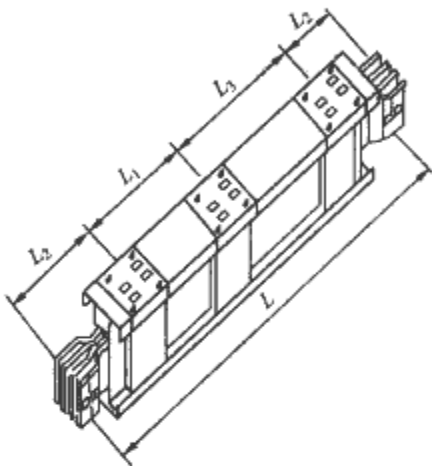


图 3.4-8 带插孔直通母线

4.4.2.3 始端母线

始端母线如图 3.4-9 所示。

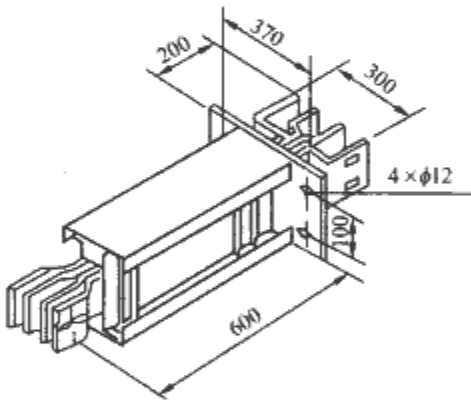


图 3.4-9 始端母线

4.4.2.4 水平弯通母线

水平弯通母线如图 3.4-10 所示。

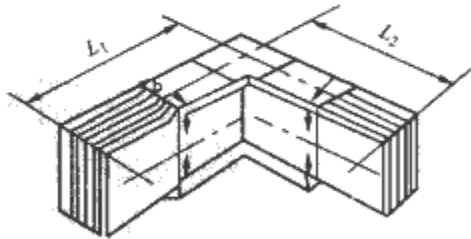


图 3.4-10 水平弯通母线

4.4.2.5 L形垂直弯通母线

L形垂直弯通母线如图 3.4-11 所示。

4.4.2.6 T形水平三通母线

T形水平三通母线如图 3.4-12 所示。

4.4.2.7 T形垂直三通母线

T形垂直三通母线如图 3.4-13 所示。

4.4.2.8 水平四通母线

水平四通母线如图 3.4-14 所示。

4.4.2.9 垂直四通母线

垂直四通母线如图 3.4-15 所示。

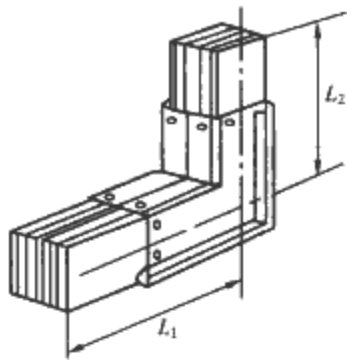


图 3.4-11 L形垂直弯通母线

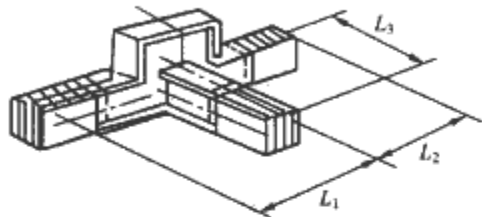


图 3.4-12 T形水平三通母线

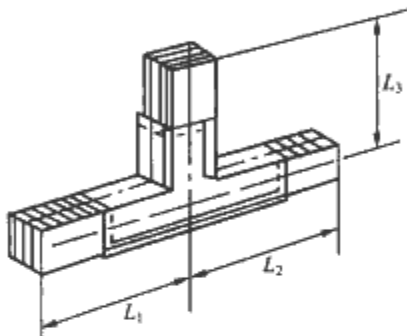


图 3.4-13 T形垂直三通母线

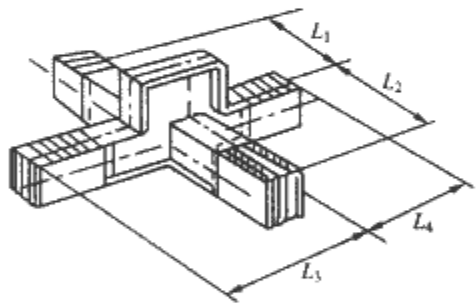


图 3.4-14 水平四通母线

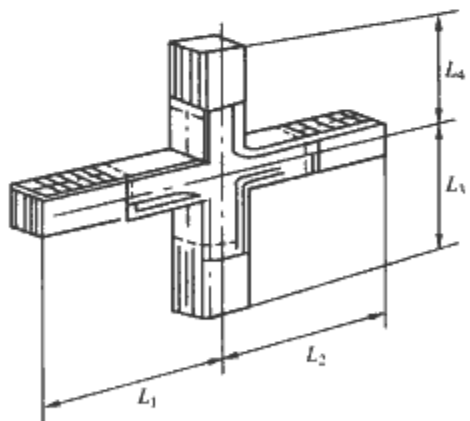


图 3.4-15 垂直四通母线

4.4.2.10 Z形垂直偏置母线

Z形垂直偏置母线如图 3.4-16 所示。

4.4.2.11 Z形水平偏置母线

Z形水平偏置母线如图 3.4-17 所示。

4.4.2.12 变容母线

变容母线如图 3.4-18 所示。

4.4.2.13 膨胀母线

膨胀母线如图 3.4-19 所示。

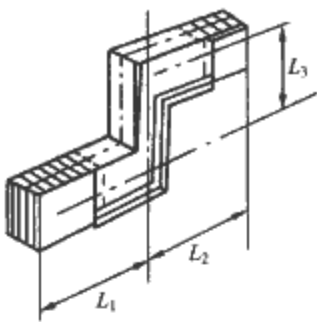


图 3.4-16 Z形垂直偏置母线

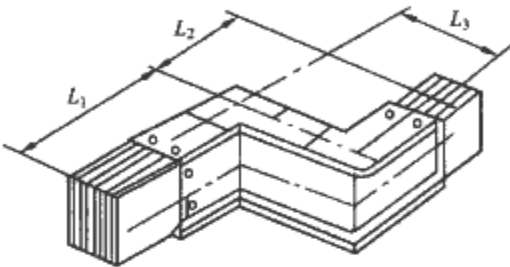


图 3.4-17 Z形水平偏置母线

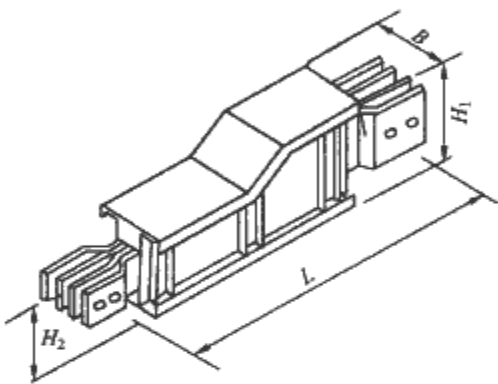


图 3.4-18 变容母线

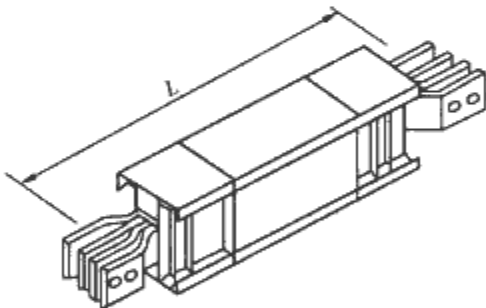


图 3.4-19 膨胀母线

4.4.2.14 终始端接线箱

终始端接线箱如图 3.4-20 所示。

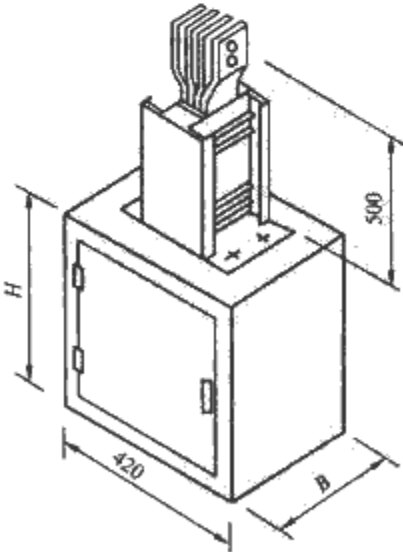


图 3.4-20 终始端接线箱

4.4.2.15 插接式开关箱

插接式开关箱如图 3.4-21 所示。

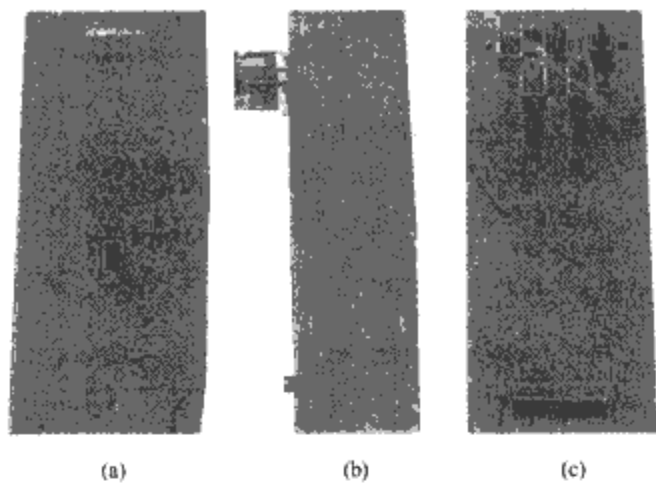


图 3.4-21 插接式开关箱
(a) 正视图；(b) 侧视图；(c) 后视图

4.4.2.16 隔离母线

隔离母线如图 3.4-22 所示。

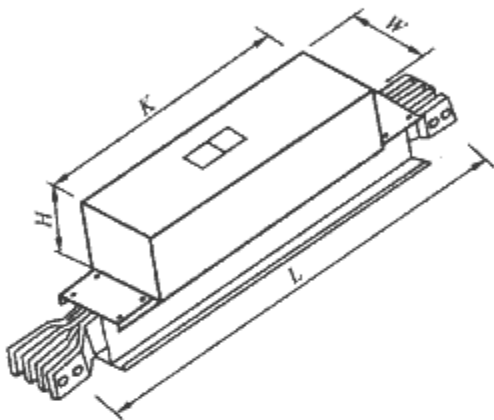


图 3.4-22 隔离母线

隔离母线用于母线变容、分支时选用隔离母线上配有的空气开关，在下级母线进行检修维护时做保护、隔离用，从而提高母线的可靠性和灵活性。隔离母线最大额定电流为 630A，其规格见表 3.4-4。

表 3.4-4 隔离母线规格

型号	额定电流 (A)	空气开关 型号	L (mm)	K (mm)	W (mm)	H (mm)
CMC-B-GL-010	100	DZ20-100	1000	480	200	130
CMC-B-GL-020	225	DZ20-200	1000	480	200	130
CMC-B-GL-040	400	DZ20-400	1000	568	238	130
CMC-B-GL-063	630	DZ20-630	1000	568	238	130

4.4.2.17 分岔式母线

分岔式母线如图 3.4-23 所示。

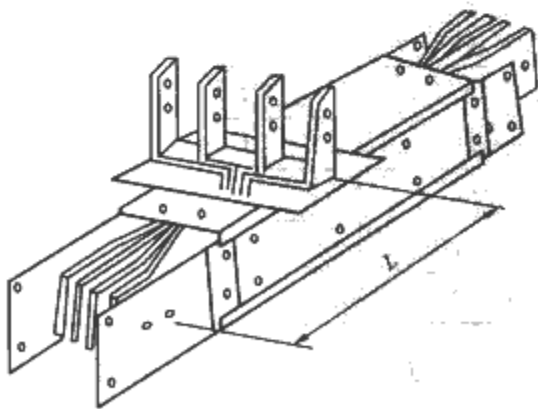


图 3.4-23 分岔式母线

分岔式母线插接箱分支电流大于 250A，则推广分岔式母线，它的最大分支电流可达 800A，并与插接开关箱配套使用，较之普通插接箱更为安全。

4.5 安装与维护

母线槽的安装是母线槽用于配电工程的主要内容。许多母线槽从设计开始就需到现场测量，然后计算、绘图、设计再施工，最后到现场安装。在安装前要了解制造商的安装规程或安装图集。

4.5.1 安装前的检查与准备

安装时要分清是水平安装还是垂直安装，是否要穿墙、过楼板等。

4.5.2 水平安装

可根据建筑的实际情况用吊架或悬臂安装。

5 母线槽设计与计算

5.1 空气型母线槽

空气型母线槽，主要由外壳、绝缘插头、金属母线组成，外壳起防尘和保护作用，外壳上开有通风孔完成散热功能，内置母线根据电流的大小每极可做成单根或双根，如外壳为金属，还有接地保护的功能，以三相母线槽为例，其主要结构示意见图 3.4-24，图中的 D_{UV} 和 D_{VW} 为相间中心距，一般取 50~55mm； b 为母线厚度； h 为相母线与外壳之间的距离，一般取几十毫米。参数 D 和 h 的选择考虑由绝缘与发热等因素决定。从绝缘角度看，要留有足够距离，以利安全；从发热角度看，也需留有足够的空间散热，保证以对流方式将热散发到空气中。

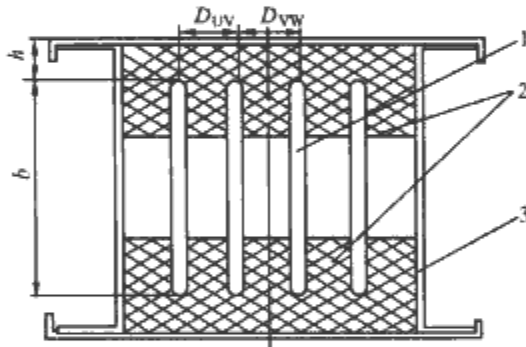


图 3.4-24 空气型母线槽

1—相母线导体；2—中线 (N)；3—绝缘层

5.2 密集型母线槽

密集型母线槽和空气型母线槽基本构造大致相同，只是母线间不留空隙，紧紧压在一起。也是主要由外壳、绝缘插头、金属母线组成，外壳起防尘和保护作用，外壳上开有通风孔完成散热功能，内置母线根据电流的大小可做成单根或双根，如外壳为金属，还有接地保护的功能，以三相母线槽为例主要结构示意见图 3.4-25。

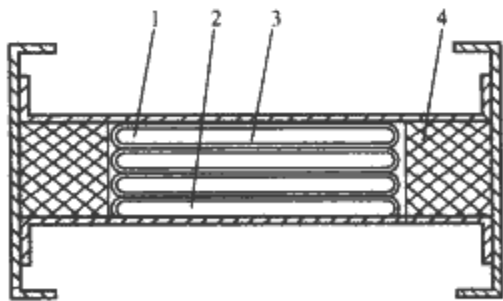


图 3.4-25 密集型母线槽

1—相母线导体；2—中性线 (N)；
3—绝缘层；4—绝缘支架

5.3 阻抗的计算

阻抗的计算按下面给出的公式进行计算。这里采用的是工程办法，可快速得出结果。式中的工程计算系数是从事工程多年积累的经验数据，并得到验证。

5.3.1 电阻

(1) 母线单位长度的电阻为

$$R_1 = K_{jf} K_{ij} R'_0 = K_{jf} K_{ij} R_0 / l$$
$$= K_{jf} K_{ij} \rho_0 C_t l / A l$$
$$= K_{jf} K_{ij} \rho_{20} [1 + \alpha(\theta - 20)] C_t / A \quad (3.4-1)$$

式中： K_{jf} 为母线集肤效应系数； K_{ij} 为母线邻近效应系数； R'_0 为母线单位长度直流电阻， $m\Omega/m$ ； R_0 为母线在温度 θ （℃）时的直流电阻， $m\Omega$ ； l 为母线长度， m ； C_t 为绞入系数； A 为母线截面积， mm^2 ； ρ_0 为母线在温度 θ （℃）时的电阻率， $\Omega \cdot mm^2/m$ ； ρ_{20} 为母线在温度20℃时的电阻率（硬铝母线取 $\rho_{20} = 0.029 \Omega \cdot mm^2/m$ ，硬铜母线取 $\rho_{20} = 0.0179 \Omega \cdot mm^2/m$ ）； α 为电阻温度系数， $1/^\circ C$ ，一般取 $0.004/^\circ C$ ； θ 为母线工作温度， $^\circ C$ 。

(2) 计算封闭母线在60℃时用硬铜导体时的电阻计算举例。根据式（3.4-1）得

$$R_1 = K_{jf} K_{ij} \rho_{20} [1 + \alpha(\theta - 20)] C_t / A$$
$$= 20.8 K_{jf} K_{ij} / A$$

5.3.2 电抗计算

水平排列母线如图3.4-26所示。计算其导体的电抗。母线单位长度电抗值按式（3.4-2）计算

$$X_0 = 2\pi f \left[4.61 \lg \frac{(2\pi D_1 + h)}{(\pi b + 2h)} + 0.6 \right] \times 10^{-4} \quad (3.4-2)$$

当电源频率 $f=50Hz$ 时

$$X_0 = 0.14451 \lg \left(\frac{2\pi D_1 + h}{\pi b + 2h} \right) + 0.01884$$
$$D_1 = \sqrt[3]{D_{UV} D_{VW} D_{WU}} \quad (3.4-3)$$

空气绝缘母线中，相母线中心距

$$D_{UV} = D_j = \sqrt{D_{UV} D_{VW} D_{WU}}$$
$$= (\sqrt[3]{50 \times 50 \times 100}) mm$$
$$= 63 mm$$

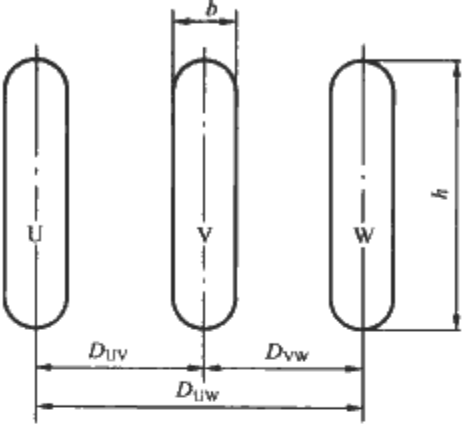


图 3.4-26 母线排列图

在密集母线中，相母线中心距一般取 $D_{UV} D_{VW} = 8mm$ ， $D_{WU} = 16mm$ ，则

$$D_j = \sqrt[3]{D_{UV} D_{VW} D_{WU}}$$
$$= D_j = (\sqrt[3]{8 \times 8 \times 16}) mm$$
$$= 10.08 mm$$

空气绝缘母线槽的几何均距（ D_j ）大于密集绝缘母线的几何均距（ D_j ）。故对同一规格的母线槽，空气绝缘母线的电抗必然大于密集绝缘母线的电抗。

5.3.3 阻抗的计算

在正常的情况下，密集母线的交流电阻较空气绝缘母线的交流电阻大，但电抗值前者要比后者小得多。这样密集绝缘母线的总阻抗小于空气绝缘母线阻抗。下面是某公司产品二类母线槽阻抗对比值（见表3.4-5），供参考。

表 3.4-5 母线槽的阻抗

母线电流 (A)	空气绝缘母线槽			密集绝缘母线槽		
	导体规格 $b \times h$ (mm×mm)	电抗 R (mΩ/m)	电抗 X (mΩ/m)	导体规格 $b \times h$ (mm×mm)	电抗 R (mΩ/m)	电抗 X (mΩ/m)
400	6×25	15.2	15.8	6×25	15.2	5.00
600	6×40	9.61	13.3	6×40	9.61	3.87
800	6×65	6.03	10.60	6×65	7.77	3.26
1000	6×90	4.44	8.86	6×90	5.32	2.37
1200	6×105	3.35	8.54	6×105	4.06	1.95
1500	6×150	2.95	6.25	6×150	3.35	1.44
2000	8×175	1.94	6.72	8×175	2.15	1.92
2500	10×200	1.45	7.09	10×200	1.65	1.42
3000	10×280	1.09	6.49	10×250	1.32	1.34
4000	2×(10×200)	0.72	3.55	2×(10×170)	0.85	0.60
5000	2×(10×280)	0.54	2.66	2×(10×200)	0.72	0.79

由表3.4-5中看出，空气绝缘母线槽的 X/R 值一般均在1以上，最大可达6，而密集绝缘母线槽的 X/R 值，基本均在1以下，最小值为0.33。

5.3.4 母线电压损失的计算

母线电压损失的计算，实际上是进行母线槽电压降的计算。母线电压降为

$$\Delta U = I(R \cos \varphi + X \sin \varphi) \quad (3.4-4)$$

式中： I 为流过母线的电流； R 为母线电阻， $R = lR_0$ ， R_0 为单位长度导线电阻； X 为母线电抗， $X = lX_0$ ， X_0 为单位长度导线电抗； $\cos \varphi$ 为负载功率因数。

将式（3.4-4）用单位长度导线电阻 R_0 、电抗 X_0 代入后，得电压降为

$$\Delta U_0 = \Delta U / l$$
$$= IR_0 [\cos\varphi + (X_0/R_0)\sin\varphi]$$
令 $C = \cos\varphi + (X_0/R_0)\sin\varphi$ ，则
$$\Delta U_0 = IR_0 C \tag{3.4-5}$$

对于一定容量的母线，额定电流为定值，而母线材料选

定后，它的电阻 R_0 、电抗 X_0 也能确定。这样，母线电压降 ΔU_0 和系数 C 成正比，即 ΔU_0 与 X_0/R_0 、 $\cos\varphi$ 成比例，为了计算方便，特在表 3.4-6 中列出系数 C 和 X_0/R_0 、 $\cos\varphi$ 的关系。

表 3.4-6 系数 C 和 X_0/R_0 、 $\cos\varphi$ 的关系

$\cos\varphi \backslash X_0/R_0$	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
10	1	5.26	6.80	7.84	8.60	9.16	9.57	9.84	10.0	10.0	10
8	1	4.39	5.60	6.41	7.00	7.43	7.73	7.93	8.04	8.06	8
6	1	3.52	4.40	4.98	5.40	5.70	5.90	6.02	6.08	6.07	6
4	1	2.64	3.20	3.56	3.80	3.96	4.07	4.12	4.12	4.09	4
2	1	1.77	2.00	2.13	2.20	2.23	2.23	2.21	2.16	2.09	2
1	1	1.34	1.40	1.41	1.40	1.37	1.32	1.25	1.18	1.09	1
0.8	1	1.25	1.28	1.27	1.24	1.19	1.13	1.06	0.98	0.90	0.8
0.6	1	1.16	1.16	1.13	1.08	1.02	0.95	0.87	0.79	0.70	0.6
0.4	1	1.07	1.04	0.99	0.92	0.85	0.77	0.68	0.59	0.50	0.4
0.2	1	0.99	0.92	0.84	0.76	0.67	0.58	0.49	0.40	0.30	0.2
0.1	1	0.94	0.84	0.77	0.68	0.59	0.49	0.40	0.30	0.20	0.1

5.3.5 母线槽辅助设计的设计程序

为计算母线槽的电阻、电抗、阻抗、功耗、能量损耗，提供一些计算程序以利于使用计算机，快速准确得到结果。它的数学模型是

(1) 母线槽交流电阻为
$$R = K_{jt} K_{ij} \rho_{20} [1 + \alpha(\theta - 20)] C_l / A \tag{3.4-6}$$

(2) 母线槽感抗为
$$X = 0.1445 \lg \frac{D_1}{D_2} \tag{3.4-7}$$

(3) 母线槽阻抗为

表 3.4-7 集肤效应系数

$b \times h$ (mm×mm)	6×30	6×40	6×50	6×60	6×80	6×110	6×150	6×200
K_j	1.015	1.026	1.04	1.055	1.09	1.15	1.21	1.25

5.4 母线槽应用问题

5.4.1 母线槽截面的选择

本节介绍配电工程师如何选用母线槽截面。原则是从电力网安全经济运行来选择母线槽。具体到技术方面转化为：

- (1) 导线电缆及母线槽截面的选择一般原则：
- 1) 按发热条件选择。即在最大连续剧烈负荷下，导线发热不超过导体所允许的温升，不会因过热而引起导线、电缆、母线槽（尤其是密集型母线槽）绝缘损坏或加速其老化，也不会因此而影响导体的机械强度，使导线、电缆、母线槽整体强度下降。
- 2) 按经济电流密度选择。以保证最低的电能损耗，并尽量减少有色金属的损耗。
- 3) 按允许电压降选择。
- 4) 按热稳定的最小截面校验。即在短路情况下，导体必须保证在一定时间内，安全承受短路电流通过导体时产生的热作用，以保证供电安全。
- 5) 按机械强度选择。即在正常工作条件下，导体应有

$$Z = \sqrt{\left\{ \frac{\rho_{20} [1 + (T - 20)]}{bh} K_j K_i \right\}^2 + (X \times 10^3)^2} \tag{3.4-8}$$

式中： K_j 为集肤效应系数； K_i 为临近效应系数。

(4) 母线槽功率损耗、能量损耗、电压降为

$$\Delta P = 3 I^2 R l$$
$$\Delta W = \Delta P \frac{Y}{10^3}$$
$$\Delta U = \sqrt{3} I l (R \cos\varphi + X \sin\varphi) \tag{3.4-9}$$

式中： l 为供电线路总长度，m； φ 为负载功率因数角。

集肤效应系数见表 3.4-7，临近效应系数取 1.03。

足够的机械强度，以防自重断裂，保证可靠运行。

6) 按动稳定校核。

(2) 按经济电流密度选择，就是降低电能损耗。以减少投资、节省有色金属消耗，但这两个条件是相互矛盾的，降低损耗、截面积要大；减少投资、截面积要小；需综合考虑各方面因素，确定符合总经济利益的导线截面为经济截面，相对经济截面的电流密度为经济电流密度（见表 3.4-8）。

对于全年平均负荷较大、线路较长时，按式（3.4-10）计算

$$S = \frac{I_n}{J_n} \tag{3.4-10}$$

式中： S 为经济截面积； I_n 为工作电流； J_n 为经济电流密度。

对于距离较远的负荷点，要考虑允许的电压损失。再用发热条件和机械强度要求校验。

(3) 导体的电压降。IEC 60204-1 给出“在正常工作条件下，从电源到负载的电压降不应超过 5%按热稳定校核”，为了遵守这一要求，须加大截面。

表 3.4-8 经济电流密度选用参考表

导体材料	最大负荷年利用时间 T_{\max} (h)		
	3000 以下	3000~5000	5000 以上
裸铜	3.0	2.25	1.75
裸铝	1.65	1.15	0.9
铜芯电缆	2.5	2.25	2.0
铝芯电缆	1.92	1.73	1.54

(4) 按热稳定校核的原则。首先考虑母排的最高工作温度，同时还要考虑环境温度，如在环境温度 40℃ 下，允许母线的工作温升为 60K，实际温度是 100℃。再考虑绝缘材料（如 A 级绝缘材料允许工作温度为 105℃）。热截面选小了，温升必高，甚至导致绝缘老化。母线槽行业，有一条“八度规律”，即每超过 8℃ 寿命减半。例如 A 级绝缘的设计寿命为 30 年，若为 105~121℃ 时，其寿命只有 7.5 年。

本条同时也适用于母线槽的母排截面选择。

(5) 按动稳定校核，依据 GB 7251.1—2005 附录 B 规定，按式 (3.1-7) 校核。

(6) 不同结构形式母线槽截面选择建议：

1) 导体密度。空气型母线槽的导体密度取 2，密集型母线槽导体密度取 1.6；大容量母线槽的导体密度选得低些，小容量母线槽导体密度可选得高些；双导体时，实践证明上层导体温度比下层导体温度高 2~3℃，选用时注意。

2) 截面选择与绝缘材料。例如环境温度 40℃，允许温升 60K，则实际温度为 100℃，可选绝缘耐热等级 A 级、允许工作温度为 105℃ 的材料。

5.4.2 如何选用母线槽

以某钢厂为例，说明母线槽选用程序。这是一个钢铁公司的铸钢分厂，考虑的原则是：母线槽的优点为，电流容量大，电压降小，短路强度高，绝缘耐压高；不足点为，接头多，散热性差，造价稍高。如何取舍，需要技术论证。

(1) 电压损失的计算。电压损失的计算条件是：例母线的额定电流为 630A，母线工作温度设为 70℃，负载是平衡的。利用式 (3.4-4)，并考虑一个工程系数 K_w 后，则有温度为 70℃ 时的电压降

$$U_{70} = K_w(R_{70}\cos\varphi + X\sin\varphi)I = 0.0789\text{V/m} \tag{3.4-11}$$

式中： K_w 为系数，对三相平衡，取 1； R_{70} 为母线每米的电阻，取 0.000 068Ω/m； $\cos\varphi$ 为负载功率因数，取 0.85； X 为额定电流下母线每米的电抗，在 630A 时取 0.000 13Ω； I 为额定电流。

(2) 母线散热量的计算。母线散热的计算条件是：母线的额定电流为 630A，母线工作温度设为 70℃，负载是平衡的。利用式 (3.4-12)，即

$$P_{70} = \frac{nI^2\rho_{70}}{S_M} = 20.3\text{W/m} \tag{3.4-12}$$

式中： n 为母线槽芯数（不包括中性线），此处对三线制取 $n=3$ ； I 为额定电流； ρ_{70} 为 70℃ 时的电阻率，取 0.021 5 Ω·mm²/m； S_M 为母线槽的总截面（包括中性线），取 315mm²。

(3) 瞬间允许电流的计算。瞬间允许电流的计算是在母线达到允许临界温度时的值，则有

$$I_M = \frac{0.8KS}{\sqrt{t}} = 38304\text{A/s} \tag{3.4-13}$$

式中： K 为母线材质常数，取 152； S 为母线截面积，取 315mm²； t 为通电时间，取 1s。

(4) 母线槽刚度的推算。母线槽刚度的推算由式 (3.4-14) 给出

$$f_p = \frac{p_0 l_m^3}{4EBH^3} = 0.24\text{cm} \tag{3.4-14}$$

式中： f_p 为变形量（水平安装最大跨距时）； p_0 为载荷（载荷有母线、插接开关和自重）； l_m 为母线槽长度（去支座间距）； E 为材料的弹性模量，如用 Q235 钢，取 0.2×10⁶MPa； B 为母线槽宽度； H 为母线槽高度。

(5) 结论。如用裸导线要在屋顶下架设时，屋顶承受导线的拉力（作用于屋顶梁架）不安全，而用母线槽，这些问题都可解决。经计算，母线槽的电压损失较小，温升也不高，刚度足够，且可防火，承受动、热稳定能力强。从经济角度看，采用母线槽的投资（按资料实例）为 60.43 万元，而用裸导线投资为 41 万元，用母线槽增加投资近 20 万元，但性能获得非常满意的结果，性价比是合算的。

5.4.3 材料与制造工艺

5.4.3.1 简述

母线槽的生产历经多年的实践获得了长足的进步，主要的改进是：绝缘材料及其加工工艺的改进（与载流件接触的绝缘材料采用 PVC 热塑套管，PMC、DMC 不饱和聚酯电弧粉绝缘支架—隔相块），母线材质的改进，外壳材料和加工方式的改进（有钢制弯制和合金铝压铸）等，主要材料见表 3.4-9。

表 3.4-9 主要材料

序号	部件名称	元件材料名称	型号规格
1	与载流件接触的绝缘材料	热塑套管 PVC	
2	与载流件接触的绝缘材料	相间隔相块 DMC	4220 电弧粉隔块
3	与载流件接触的绝缘材料	垫块 DMC	4220 电弧粉隔块
4	母排	铜母排	TMY

5.4.3.2 热缩套管的热缩工艺

热缩套管的热缩工艺是母线槽生产中质量保证的关键工序。母线槽的寿命、可靠性、抗老化等性能指标取决于它的绝缘层。母线绝缘工艺决定于绝缘材料的类别，绝缘材料有表 3.4-8 所示的不同材料，因此绝缘层工艺有热缩套管，橡胶套管，而老式的、采用聚四氟乙烯绝缘带缠绕等（不同的材料见表 3.4-9）。

母线槽对绝缘材料的要求是绝缘击穿电压：不低于 20kV；最高使用温度：长期 110℃，短时 130℃；燃烧自燃时间：小于 10s；氧指数：小于 30；抗拉和抗撕裂强度：大于 1kN/mm²；相对伸长率：大于 200%；抗老化寿命：不小于 50 年。在表 3.4-10 中给出各种母线槽用绝缘材料。

表 3.4-10 母线槽用绝缘材料

材料名称	处理后变化	处理时间 (h)	基本性能	材料牌号
乙丙橡胶	无变化	96	化学稳定、耐老化最优、耐水、耐臭氧	MT-7-3 带老化剂 RM-1，温度 150℃，480h（上海电缆所：MT-7-3，160℃）
氟橡胶	变硬、脆	48	耐老化差	
硅橡胶	黏	4	耐老化良	
丁基橡胶	表面稍黏	48	耐老化优	
丁腈橡胶	变硬、脆	8	耐老化好	
天然橡胶	黏	24	耐老化中	
氯丁橡胶			化学稳定、耐老化较差	

在母线槽使用的绝缘材料中，乙丙橡胶具有很高的化学稳定性，具有优异的耐老化性，及臭氧氧化性，耐水性。在建筑材料中可作为屋顶材料，代替沥青，其寿命达几

十年。
5.4.3.3 聚四氟乙烯等材料的技术参数及寿命
(1) 聚四氟乙烯及相关材料的技术参数（见表 3.4-11）。

表 3.4-11 聚四氟乙烯及相关材料的技术参数

材 料	最小厚度 (μm)	介电系数 (1kHz, 23℃)	工作温度 (℃)	损耗因数 (1kHz, 23℃)	绝缘时间常数 (23℃) (s)	介质吸收 (%)	失效率 (次/10 亿 h)
聚四氟乙烯	3 (1)	2	-55~+250 (300)	0.01	10 000	0.02	5000
聚乙烯		2.3	-55~+70 (90)	0.02	10 000	0.01	6000
聚苯乙烯	4	2.5	-55~+70 (85)	0.02	10 000	0.01	6000
聚丙烯	4	2.2	-5~+85 (105)	0.03	10 000	0.01	7000

(2) 聚四氟乙烯的寿命。例如，聚四氟乙烯的寿命按聚四氟乙烯的失效率折算。其失效率 5000 次/10 亿 h，换算成次/年为：5000 次/10 亿 h=1 次/22.8 年。即近似认为：聚四氟乙烯的故障率每年发生 1/22.8 次。聚四氟乙烯的寿命为 22.8 年。

绝缘工艺目前较为先进的是流化绝缘工艺。所谓“流化”是指一种操作方式，它是将绝缘材料涂覆在母排上，通过一定时间，经过预热、固化后，控制涂覆层厚度，流化工序是采用专门的流化床。流化床设备包括透气板、送气系统、工件预热炉、自动传动链、升降车、固化炉、计算机控制设备等。流化速度：25m/h；流化精度和厚度：1mm±0.1mm；流化后工件击穿强度：不小于 20kV/mm；冲击弹性：不小于 30%；燃烧试验 V 级。流化工艺采用的绝缘材料是阻燃型环氧树脂粉末，用流化形式形成的绝缘层有良好的绝缘强度，也具有耐潮湿性，经试验绝缘层与铜排伸缩性保持一致。

5.4.3.4 母排焊接工艺

(1) 母线槽的母排焊接工艺。也是母线槽保证质量的重要工序之一。它包括：校平、校直、切断、弯制、去毛刺、焊接、前处理、浸锡、(穿套管)校平、校直。母排工序中设备有母排专用弯制机（既能平弯还能立弯），焊接要用亚弧焊，焊后用超声探测设备检验，特别是铜排接头处，甚至全部长度都要浸锡或镀银。为了保证质量和生产效率要求，浸锡采用专用的超声浸锡设备。浸锡的前处理指的是喷砂，喷砂采用喷砂机（如 KING-9096A 型喷砂机）。采用橡胶套管进行绝缘时，选择的套管尺寸要合适，套管的内径尺寸要比铜排的外径尺寸稍小，铜排对套管的穿通过程是在冷状态下进行，有专门的加工厂配套外协加工。最大穿管长度为 3.5m。需满足几十种规格尺寸需要（如母排宽度有 30~200mm，厚度 3~12mm）。穿管速度 60m/h。也有的生产厂用注塑挤出包覆方式完成这一工序。

铝排的焊接比铜排的焊接要复杂些。较新的工艺是氩气焊，它与一般氩弧焊不同。虽然都是用氩气作为焊接时的气体保护剂，但工艺操作和所用设备都不同。该设备目前国内尚未生产，要依靠进口。但总的来说，在节能、节材的社会环境中，大力推广铝材母线槽仍然是重大举措。

(2) 插入式活动接头。是母线干线单元之间的导电连接的方式和结构之一。它是影响整个母线系统工作质量的关键因素。传统连接方式为母排搭接、现场单片插接。但装配（包括焊接）质量稍有差错，将导致温升过高，频繁故障。目前大多数都采用插接式。为了保证插接可靠，在接头插入段，插入干线单元后，采用一种特制的高强度绝缘螺栓和蝶形垫片实施压紧，再加上插接体的设计，保证每相有两片导电片接触，以达到准确稳定的接触压力。

5.4.3.5 组装机工艺

产品的组装包括：组装、翻转、压紧、跟踪点焊、测试等，组装方式一般为用螺钉紧固，也有采用点焊的和采用气动 TOX 铆装设备的（可提高装配质量），组装后进行出厂检验。套完套管后，在组装前为防止变形，不要平放，而是悬挂吊起，以备组装用。

5.4.3.6 工程中的母线槽设计与加工

在母线槽的工程应用中时常遇到母线槽在空间倾斜走向，特别在变电站施工过程中需要一些简化的工程办法。如何测量尺寸和工厂加工？我们归纳为平弯和立弯来叙述。以 YWP-10P 弯排机为例，设两个固定轴间销距的一半 $b=35\text{mm}$ ， a 为引排要求的进深差（以设备上实测而得）。

(1) 平弯。平弯如图 3.4-27，设 $OO_1=OO_2=b$ ；若二弯制点的间距为 c ，令 $AB=c$ ；则弯排机的行程 X 为

$$X = b \tan(1/2 \arcsin a/c) \tag{3.4-15}$$

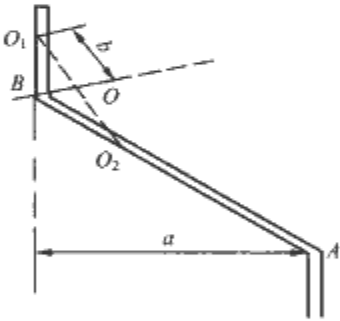


图 3.4-27 平弯示意图

实际应用时，由于母线材质不同，弯后工作回缩时排的回弹，给个系数。则有

$$X = K_1 b \tan(1/2 \arcsin a/c) \tag{3.4-16}$$

将式 (3.4-16) 的计算结果列表（见表 3.4-12）。而母线回弹性系数 K_1 ，一般取 1.1~1.25。

表 3.4-12 平弯系数

a/c	X	理论估算值
<0.2	$ab/2c$	
0.3	$0.15/b$	5.4
0.4	$0.21b$	7.4
0.5	$0.27b$	9.5
0.6	$0.33b$	11.6
0.7	$0.41b$	14.4
0.8	$0.5b$	17.5
0.9	$0.67/b$	23.5
1.0	b	35

现场施工时，可人为选择 c ，而 a/c 能查表，再推算 x 值。

(2) 立弯。立弯如图 3.4-28 所示。给出活塞行程 X 式 (3.4-17)，立弯系数见表 3.4-13，表中列出的是母线立弯理论估算值。它比实际值偏小，可用实用式 (3.4-18) 计算。

表 3.4-13 立 弯 系 数

c/a	X	b				
		240mm	260mm	280mm	300mm	320mm
$1 \geq (b)$	$0.141b$	100	108	116	124	132.5
1.15	$0.268b$	64	70	75	80.4	85.8
1.25	$0.25b$	60	65	70	75	80
1.5	$0.187b$	45	49	52.4	56	60
2	$0.132b$	31.7	34.3	37	39.6	42.2
2.5	0.16	24	26	28	30	32
3.0	$0.085b$	20.4	22.1	23.8	25.5	27.2
3.5	$0.072\ 6b$	17.4	19	20.3	22	23.2
4.0	$0.063\ 3b$	15.2	16.5	17.7	19	20.3
5.0	$0.05b$	12	13	14	15	16
6.0	$0.042b$	10	11	12	12.6	13.5
7.0	$0.036b$	8.7	9.3	10	11	11.7
8.0	$0.031\ 3b$	7.6	8.2	8.8	9.4	10
9.0	$0.028b$	6.7	7.3	7.9	8.4	9.0
10.0	$0.025b$	6	6.5	7	7.5	8

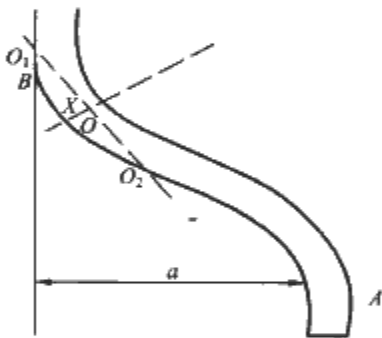


图 3.4-28 立弯示意图

$$X = \frac{K_2 b}{1 - \cos \alpha} [\sqrt{2(1 - \cos \alpha)} - \sin \alpha] \quad (3.4-18)$$

式中： K_2 可视母排的材质情况而定，通常取 1.3~1.5。

至于表中 $c/a > 10$ 情况未列出。例 $c/a = 12$ ，可先查 $c/a = 6$ 时，得 $x = 0.042b$ ，则 $c/a = 12$ 时， $X = 0.012b$ 。在立弯时两轴销一定要放在同一档次上，且在工作缸活塞推进时，两侧应同时与排接触，否则会产生不必要人为误差。

6 典型产品

6.1 CCX6、CKX6 母线槽

CCX6 为密集母线槽，CKX6 为空气型母线槽。它符合 IEC 60439、ISO 0834、GB 7251-1、GB 7251-2、JB/T 8511、JB/T 9662、JB/T 10327 等标准要求。目前已推广到全国，CCX6 主要技术参数为：额定电流不大于 5000A；额定电压为 380V、660V；额定频率为 50Hz；额定绝缘电压为 690V；安装类别Ⅲ、Ⅳ；防护等级 IP40；额定短时耐受电流 20、30、50kA。CKX6 主要技术参数为：额定电流不大于 1250A；额定电压为 380V、660V；额定绝缘电压为 690V；额定频率为 50Hz；安装类别Ⅲ、Ⅳ；防护等级 IP30；额定

$$X \approx \frac{b}{1 - \cos \alpha} [\sqrt{2(1 - \cos \alpha)} - \sin \alpha]$$
$$\alpha = \arcsin \frac{a}{b} \quad (3.4-17)$$

短时耐受电流 20、30kA。

6.2 耐火母线槽

以 CMX6、CKX6 为例做介绍，CMX6 为密集耐火母线槽，CKX6 空气耐火母线槽。它符合 IEC 60439、ISO 0834、GB 7251-1、GB 7251-2、JB/T 8511、JB/T 9662、JB/T 10327《耐火母线干线系统（耐火母线槽）》等标准要求。主要用于化工、冶金、机械文化体育场馆、展览馆、档案馆、博物馆、机场、车站等社会公共场所以及高层建筑的输配电系统和消防系统专用，在正常情况下（非火灾情况）正常供电，火灾情况下切断正常供电，以额定电流给消防设备供电，进而做到正常与消防供电两者兼用。耐火母线槽的结构，在钢板外壳内充满用耐火隔热布包裹的耐火隔热材料，然后将有外包钢内壳的铜导体部分置于耐火隔热材料中，形成导热、防火、防爆等功能。

有关耐火材料资料说明如下：

防火耐火布为 CV 系列玻璃纤维布经特殊处理后的一种产品。其规格见表 3.4-14。它的优点是良好的隔热性，其涂层在高温下体积迅速膨胀，形成保护层。防火耐火布与防火板共同使用效果更好。

表 3.4-14 CV 系列防火耐火布规格

厚度 (mm)	宽度 (mm)	颜色
0.8, 1.2, 1.6	1000, 1500	黄褐色

防火板（符合 A 级不燃材料检验标准）的使用温度为 1200℃，密度为 280kg/mm³，耐火极限不小于 4h，导热系数为 0.16W/（m·K）（800℃时）。防火板的规格见表 3.4-15，防火板可以机械加工、切割。具有隔热、耐火、高温绝缘、低热容、低热导率、抗振、质量轻等优点。

表 3.4-15 防火板规格

厚度 (mm)	宽度 (mm)	长度 (mm)	颜色
20, 30, 40, 50	600	990~1200	白色、黄褐色

防火胶：防火胶的耐火温度不小于 1000℃。

防火堵料：在工程上应用非常广泛。即可用于防火母线槽也可用于其他工程（如变电站防止小动物进入而封堵洞口），还可堵火、堵烟。常用的防火堵料有无机防火堵料、塑性防火堵料和防火包。下面介绍三种防火堵料，他们都达到国家一级耐火等级。

（1）FD-W 型无机防火堵料。耐火性能不小于 180min，干密度不大于 $2.5 \times 103\text{kg/mm}^2$ ，耐水性不小于 3d，耐油性不小于 3d，耐腐蚀性不小于 7d，抗压强为 7.6MPa，初凝时间为 17min。

（2）FD-S 型塑性防火堵料。有一定柔韧性，松散密度不大于 $1.2 \times 103\text{kg/mm}^2$ ，耐水性不小于 3d，耐油性不小于 3d，耐腐蚀性不小于 7d。

（3）PFB 耐火包。耐火性能不小于 180min；干密度不大于 $2.5 \times 103\text{kg/mm}^2$ ，耐水性不小于 3d，耐油性不小于 3d，抗压强为 7.6MPa，抗跌落性为 5m（5m 高度自由落在混凝土地面上包体无破损）。

耐火母线槽产品的特点是：它能满足普通母线槽的技术要求，还能满足消防的要求，耐火隔热材料无污染，火灾情况下，无有害气体溢出，符合环保要求。产品选用了高性能无机耐火隔热材料，做到了良好的耐火、隔热、绝缘、抗潮、耐老化、耐化学腐蚀等多种高性能。材料性能稳定无毒、无烟、无卤，价格便宜，适合大面积生产、推广。在生产过程中 CMX6 密集耐火母线槽、CKX6 空气耐火母线槽经过耐火隔热处理，可做到在火灾情况下，保证正常用电，其导体的温度不超过 250℃。

6.3 铝合金外壳密集型母线槽

铝合金外壳密集型母线槽采用铝合金散热器形状的外壳，将比常用的母线槽系统节约一半空间。可承受 80kA、1s 的短路。并且散发到空间的磁场降低到较低水平，也较少产生噪声。内装导电排是三明治设计，火和烟根本无法在电汇排内流动，无需装设内置的防烟屏。母线结构常规设计是三条导线为三相，及一条和导线面积大小相等的中线，也可有三相三线制，三相三线+面积减半的中线制，三相五线制等。每种型号的导体都分为铜制与铝制两种（铜导体最高温度为 55℃，铝导体最高温度为 50℃），外壳 40℃，铝合金做外壳的母线槽要选择耐腐蚀的材料。

第5章 照 明 配 电 板(箱)

1 简述

1.1 定义

照明配电板(箱)是一种非专业人员可入场地的低压成套开关设备,是配电工程设备的末端开关设备,总称“配电板”。

配电板为民用或类似家用产品,使用和操作此设备人员可以是非专业人员,因此在安全规程上有较严格的防止直接触电和间接触电危险(如接地)的保护。其定义是:一种带有开关或保护器件(如熔断器和小型断路器),并带有由一条或多条进出线电路,以及用来连接中性导体和保护电路导体端子的成套设备。它也可以带有信号和其他控制器件。绝缘设施可以包括在内,也可以单独提供。

自微型断路器(MCCB)问世以来,出现了一种小型、配置简单、性价比高、灵活安装的配电板(箱)。它的功能是电能分配、终端用电的保护、电能的计量等。

目前适用的产品有照明配电箱、插座箱、计量箱“三箱”产品。20世纪80年代初期,上述三箱产品作为统一产品(三箱类)开发、生产、销售,并受到广大用户的欢迎,此后随着各类建筑物功能要求不断提高,更加美观实用、更加功能齐全的照明箱进入市场,以及各种低压电器、电子式、微电子式、数字化智能总线产品及可用导轨直接安装的低压电器的逐步推广应用,带来了产品的更新换代。

1.2 分类

- (1) 按壳体材料分为钢制、塑料制、钢塑结合、不锈钢制。
- (2) 按电器功能分为照明、计量、插座、分线、保护(熔断箱)、控制、综合一体化配电板。
- (3) 按特殊功能分为工业专用、教育、工控、智能控制。
- (4) 按安装方式分为明装、暗装或明装与暗装通用。
- (5) 按使用环境分为户内、户外、高防护、隔爆、三防等。

2 标准及主要技术要求

GB 7251.3《低压成套开关设备和控制设备 第3部分:对非专业人员可入场地的低压成套开关设备和控制设备—配电板的特殊要求》,它等同采用国际标准 IEC 60439-3。

GB 7251.1的大部分条款适用于配电板,但在一些方面有所不同,在下面相关内容中加以说明。

2.1 结构部件附加要求

照明配电板(箱)在成套设备中结构部件有装饰用部件,它是仅为美化外观,而不提供任何机械或电的防护作用。

2.2 配电板的特殊要求

2.2.1 从 GB 7251.1—2005 中去除的条款

- (1) 不适用开启式设备,GB 7251.1—2005 的 2.3.1 条去除。
- (2) 不能制作成移动式设备,GB 7251.1—2005 的 2.5.4 条去除。
- (3) 不能设内部通道,GB 7251.1—2005 的 2.2.7 条去除。
- (4) 不能有抽出式部件,GB 7251.1—2005 的 2.2.6 条去除。

2.2.2 与 GB7251.1 中条款结合加上不同具体要求

2.2.2.1 配电板的额定电流

配电板的额定电流由制造商按进线电路的额定电流来确定。如有多条进线电路,配电板的额定电流是同时使用的所有进线电路额定电流的算术和。当按照 GB 7251.1—2005 中 8.2.1 条进行试验时,应施加此电流,各部件的温升不应超过 GB 7251.1—2005 中 7.3 条中规定的限制。

2.2.2.2 额定分散系数

存在负载用电的非同期性而引出的分散系数概念,不仅适用产品设计,同样适用型式试验的验证。

照明配电板(箱)的额定分散系数与成套设备的额定分散系数不同,这是因为照明配电板(箱)配置在开关设备的末端,属于使用频繁的开关设备,因此它的额定分散系数在同等情况下要比 GB 7251.1 规定的系数值小。照明配电板(箱)的额定分散系数在缺少实际电流资料的情况下,按表 3.5-1 中选取,表中主电路数是指连接在每个供电相上的出线电路的数量。

表 3.5-1 照明配电板(箱)的额定分散系数

主 电 路 数	额定分散系数
2 和 3	0.8
4 和 5	0.7
6 至 9	0.6
10 (及以上)	0.5

2.3 使用条件

照明配电板(箱)使用条件除污染等级外,一般等同于成套开关设备(见 GB7251.1),照明配电板(箱)的污染等级为 2 级,即照明配电板(箱)一般在污染等级 2 环境条件下使用。此时只有非导电性污染,但是也应考虑偶然由于凝露造成的暂时的导电性。

对于嵌入式成套设备,嵌入墙内不应视为特殊条件。

2.4 设计和结构

照明配电板(箱)的设计与结构除成套设备规定的外,还需要考虑下面因素。

- (1) 打算给非专业人员使用的成套设备应按照型式试验低压成套开关设备和控制设备(TTA)进行设计,不能采用 PTTA 设计。
- (2) 照明配电板(箱)的防护等级没有优选值 IP00

- (无防护), 最低为 IP2XC, 需给出防护等级中对手指和固体异物进入壳体的防护内容。
- (3) 用绝缘材料制成的配电板零部件, 其耐热能力应按照专门的绝缘材料耐热性验证。
- (4) 绝缘材料对内部电气作用引起的非正常热和着火的耐受能力, 应按照专门的绝缘材料内部电气作用引起的非正常热和着火的试验验证。
- (5) 配电板的黑色金属结构部件, 外壳应具有防锈能力, 并按专门的耐锈性能验证试验。
- (6) 配电板的外壳应耐受冲击强度验证(装饰用部件和单独的器件不需耐受冲击试验)。
- (7) 在安装和维修过程中必须拆卸的盖板不应用来支撑元器件。当拆卸盖板时, 连接元器件的导体会因此承受一定的应力, 这种情况下, 应选用带铰链的门。
- (8) 门和带铰链的类似设施应易于接近和便于操作内装元件。

3 典型产品

3.1 通用三箱产品

3.1.1 典型配电板产品

典型配电板产品是集各种功能(照明、计量、插座、控

- 制)于一体的综合配电板。其电器原理图见图 3.5-1。
- (1) 主要技术性能:
- 1) 工作电压为 380 (400) V 或 220 (230) V (单相或三相)。
- 2) 额定绝缘电压为 400V, 500V, 630V, 660V 等。
- 3) 工作电流通常为 10~250A。
- 4) 短路强度(额定短时耐受电流)为不大于 10kA (一般为 4.5kA, 6kA, 10kA)。
- 5) 防护等级不低于 IP20C (一般为 IP30), 箱外安装的插座, 必须选用有防止直接接触电危险的保护插座。
- 6) 内装典型配置元件有小型断路器、漏电断路器、熔断器等元件, 也可安装电能表、插座及控制电器(如接触器、按钮、指示灯、标准 BAUS 总线系统等)。
- 7) 漏电保护, 额定漏电动作电流为 0.03~0.10A, 额定漏电动作时间为 0.1s。
- 8) 防触电保护类别为 I 类、II 类、III 类, 通常为 I 类。
- 9) 电气间隙通常不小于 5.5mm。
- 10) 爬电距离通常不小于 8mm。
- (2) 综合配电板原理见图 3.5-1。
- (3) 典型配电板外型及其技术性能见图 3.5-2 和表 3.5-2。

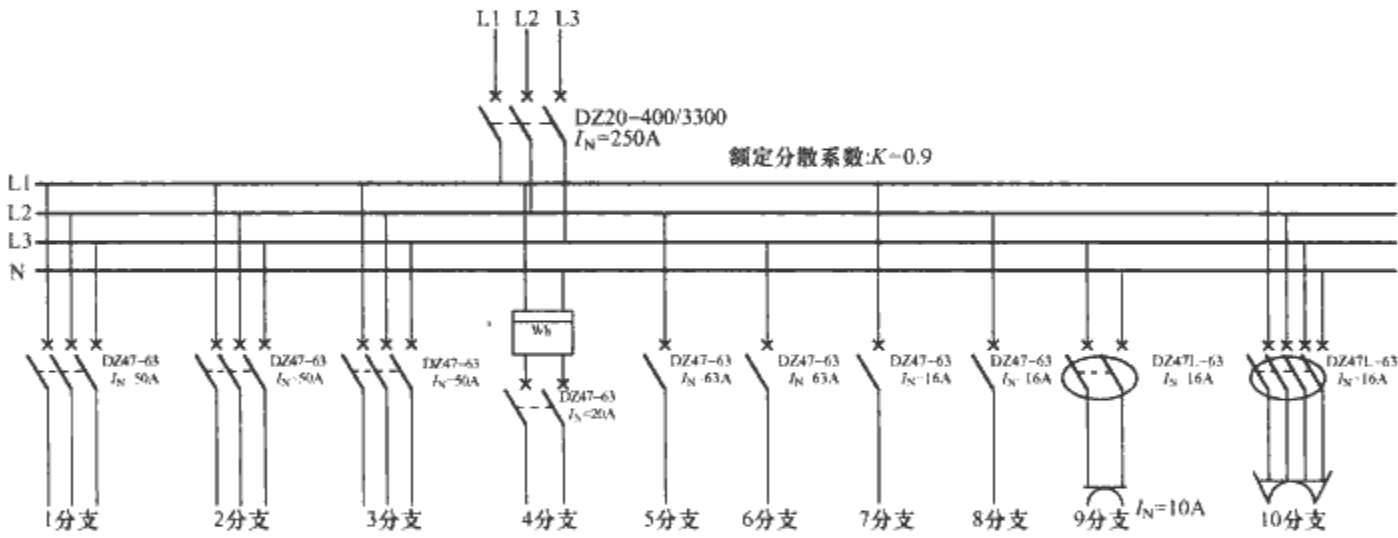


图 3.5-1 典型综合配电板原理图

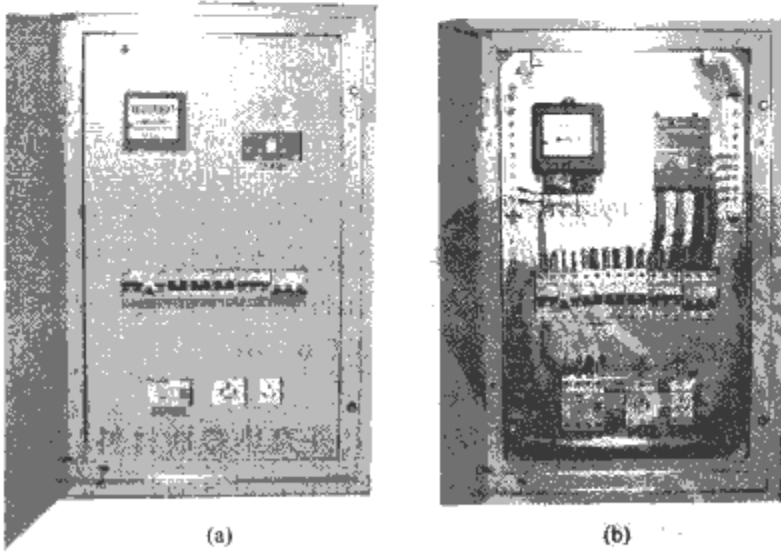


图 3.5-2 典型配电板外型照片
(a) 外观; (b) 内部结构

表 3.5-2 典型配电板技术性能	
电 参 数	指 标
额定工作电压	380V/220V
额定绝缘电压	500V

续表

电 参 数	指 标
额定电流	250A
额定短时耐受电流	6kA
主开关分断能力	6kA
过电压类别	III
材料组别	III a
爬电距离	8mm
电气间隙	5.5mm
防触电保护类别	I 类
外壳防护等级	IP30
额定漏电动作电流	0.03~0.10A
额定漏电动作时间	0.1s
额定分散系数	0.6

3.1.2 XG (M1, Z1, C1) 系列照明配电箱

XG (M1, Z1, C1) 系列照明配电箱是国内广泛应用的产品, 全国统一设计的配电板产品称之为“三箱”, 它的型号为 XG (M1, Z1, C1) 系列 (XGM1 照明配电箱, XGZ1 插座箱, XGC1 计量箱)。它的特点是: 明装与暗装通用, 专设元器件安装板以方便暗装箱施工。可在产品内加装端子, 以解决施工中配线的多路分线问题。它的结构参数见表

3.5-3, 电气参数见表 3.5-4。

表 3.5-3 XG (M1, Z1, C1) 系列照明配电箱结构参数

产品名称	箱型 代号。	最多可装 元件数	外形尺寸(mm)			备注
			宽	高	厚	
照明 配电箱	06	6	325	240	120 (180)	
	09	9	400			
	12	12	425			
	15	15	550			
	18	18	500			
	24	24				
插座箱	45	5	560	200	120	
	49	9		280		
计量箱	50	1	350	380	140	计量箱内装 电能表
	51	1	240			
	52	2	380			
	53	3	520			
	54	4	600			
	56	6	600			
	58	8	600			

表 3.5-4 XG (M1, Z1, C1) 系列照明配电箱
产品电气参数

电 气 参 数	标 称 值
额定工作电压	380V/220V、50Hz
输入电流最大值	不大于 63A
单路输出电流	不大于 32A
额定漏电动作电流	0.03~0.10A
额定漏电动作时间	0.1s
额定短时耐受电流 (有效值)	25kA

3.2 立式横装三箱产品

3.2.1 G 系列三箱产品

可用于工业、民用, 交流 50Hz、电压 220V/380V、电流 125A 及以下单相或三相, 户内或户外使用的照明配电箱。此类产品结构布置为元件横装, 俗称排骨箱。

3.2.2 CDX 配电箱

CDX 配电箱适用于建筑工程。用于楼宇照明间、小型电动设备终端单相及三相配电, 具有过载、短路、漏电保护。它的技术规格是:

- (1) 最大工作电流。A 型 100A, B 型 200A。
- (2) 最大工作电压。单相: 230(220)V, 60(50)Hz; 三相: 400(380)V, 60(50)Hz。
- (3) 回路数。A 型单相 12 回路, 三相 12 回路; B 型有 4, 6, 8, 12, 16 回路。
- (4) PE、N 端子。PE、N 端子分布于箱体的左右两侧, 各有 25 个, 其截面积最大为 50mm², N 线最大截面积达 120mm², PE、N 端子出线截面积均为 16mm²。

3.3 PXT 系列配电箱

3.3.1 概述

PXT 系列配电箱是国内广泛应用的产品。产品分明装与暗装两种, 正面有操作小门 (或不带小门), 主开关有单极、双极、三极, 壳体用薄板制造。箱盖用薄板拉伸工艺成型。产品外形图见图 3.5-3。

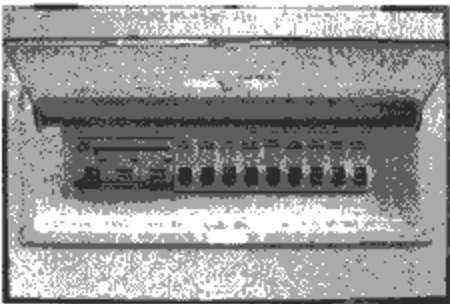
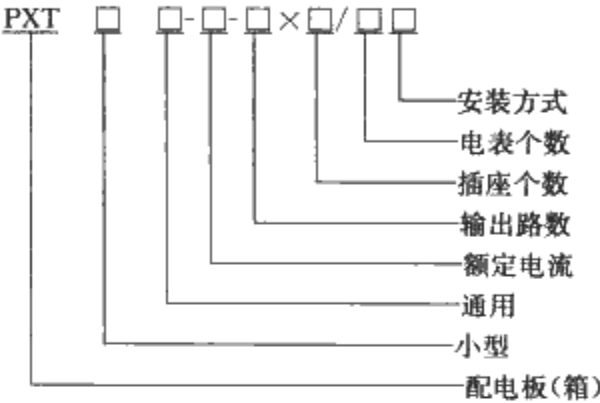


图 3.5-3 PXT 型配电箱外形图

3.3.2 产品型号



3.4 塑料外壳配电板 (箱)

塑料外壳配电板, 外壳热塑性材料, 防护等级达到 IP40、IP65、IP66、IP67, 达到浸水级要求。在箱体的上、下部有用于电缆进、出线的孔, 可根据需要用密封件密封。适用于在恶劣的环境下使用, 可有效的防尘、防水、耐腐蚀。塑料外壳配电板有单排及多排, 有明装和暗装, 时尚美观, 耐冲击, 可满足用户的需求。

3.4.1 塑料外壳照明箱

塑料外壳照明箱, 有明装型及暗装型, 有单排及多排照明箱, 在安装位置高度受限制时使用, 具有相同模数的箱体还可并联使用 (见图 3.5-4), 以增加回路数。

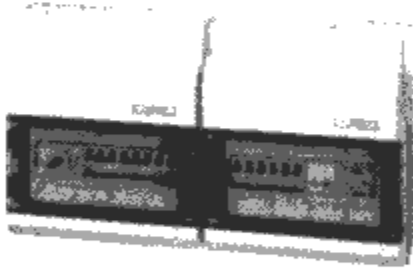


图 3.5-4 箱体并联

3.4.1.1 KV 型明装照明箱

KV 型明装照明箱见图 3.5-5。额定电压交流 400V, 外壳热塑性材料, 灰色, 透明门, 防护等级 IP65、IP41, 带有弹性自动密封导线输入孔, 元件窗口空位条见图 3.5-6 (a), 固定元件的标准卡轨见图 3.5-6 (b)。

3.4.1.2 KV 型暗装照明箱

额定电压交流 230V/400V, 外壳热塑性材料, 灰色, 有透明门和不透明门, 防护等级 IP40, 带有铜 PE 和 N 接线柱、元件窗口空位条、固定元件的标准卡轨。

3.4.2 塑料外壳计量箱

额定电压交流 400V, 外壳热塑性材料, 灰色, 透明门, 防护等级 IP65、IP41, 带有弹性自动密封导线输入孔、仪表安装板、导线罩盖。透明门, 可挂锁、可铅封, 见图 3.5-7。

3.4.3 塑料外壳端子盒

额定电压交流 400V, 外壳热塑性材料, 灰色, 防护等



图 3.5-5 KV 型明装照明箱

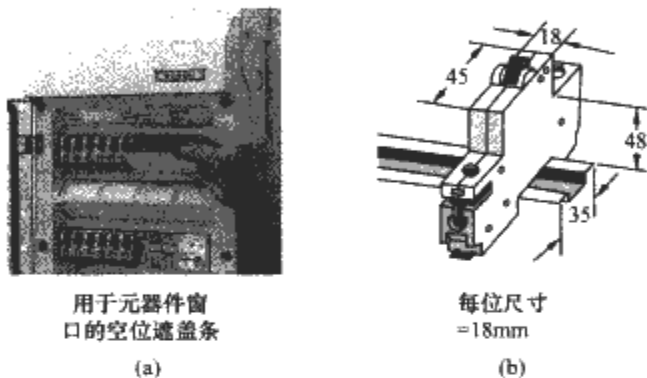


图 3.5-6 窗口空位条、固定元件的标准卡轨示意图
(a) 空位遮盖条; (b) 标准卡轨

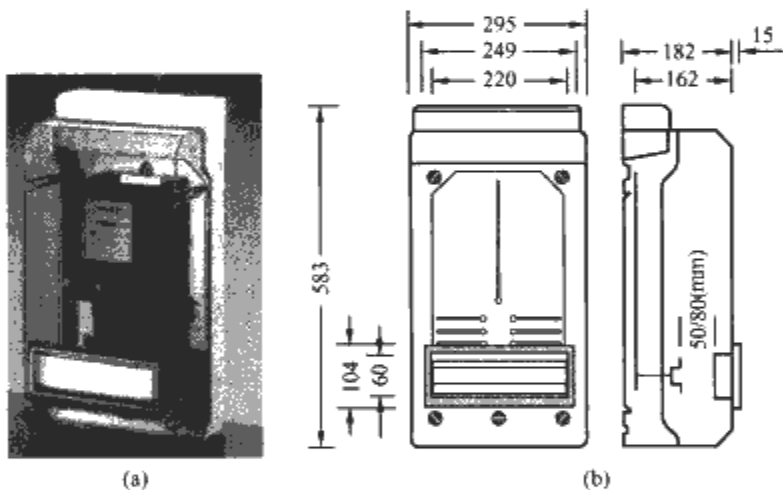


图 3.5-7 塑料外壳计量箱
(a) 照片; (b) 尺寸示意

级 IP65、IP54，带有弹性自动密封导线输入孔，导线输入、输出管采用管接头的密封措施，连接导线的截面积范围 1.5~240mm²。见图 3.5-8。

3.4.4 带插接装置的配电板

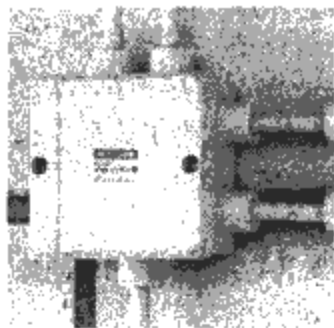
带插接装置的配电板防护等级可达 IP65、IP66、IP67，达到浸水式要求。在箱体的下部和侧面有用于电缆进、出线的接插件。

3.4.5 带控制器件的配电板

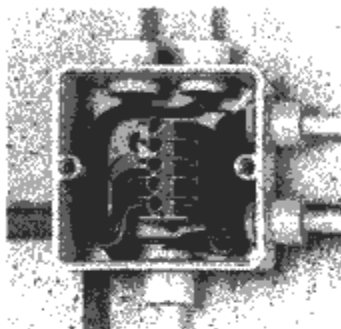
外壳热塑性材料，灰色，透明门，防护等级 IP65、IP41，可以安装非操作元件，安装深度 72mm，安装高度 125~150mm。额定电压交流 400V，用于控制，例如控制电动机。带有弹性自动密封导线输入孔、导线罩盖、元件窗口空位条、固定元件的标准卡轨，见图 3.5-9。

3.5 不锈钢壳体的照明箱

不锈钢材料壳体可适用于室外及多水、灰尘和腐蚀性气体、液体等环境。



(a)

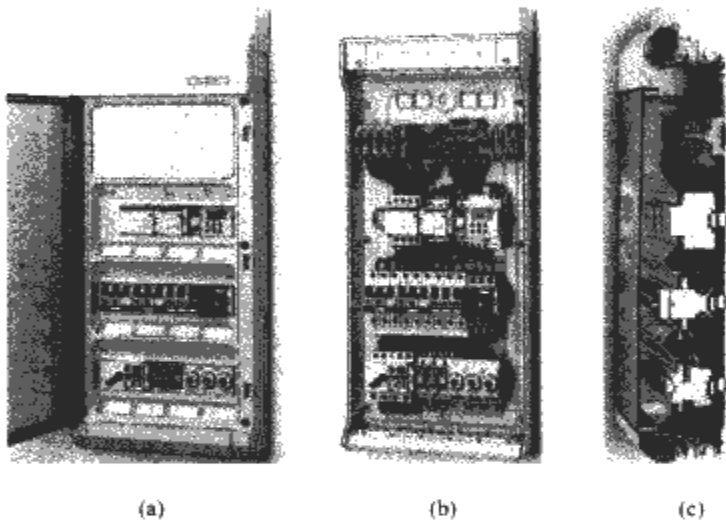


(b)



(c)

图 3.5-8 塑料外壳端子盒
(a) 外观; (b) 内部结构; (c) 安装方式



(a)

(b)

(c)

图 3.5-9 带控制器件的配电板
(a) 外观; (b) 内部结构正视图; (c) 内部结构侧视图

3.6 配电箱的附属设备

3.6.1 模数化梳状母排

模数化梳状母排是根据内装微型断路器 (MCCB) 的标准模数之间的连线需要而特殊设计生产的专用连接件 (在本篇“低压成套辅助设备”章中有专节叙述)。梳状汇流排有单相二线、三相三线、三相四线等。规格及技术数据 (见表 3.5-5)。

表 3.5-5 梳状汇流排技术数据

规格	相位数	根数×每根 齿数/套	单根齿间 隙 (P)	额定载 流量 (A)	额定绝缘电压 (V)
Cg-I	单相	1×35	1	100	500
Cg-II	二相	2×18	2	100	500
Cg-III	三相	3×12	3	100	500

3.6.2 零排 (N)、接地排 (PE)

零排 (N)、接地排 (PE) 是标准照明配电中配用的附属设备，是由导电材料制作，有若干连接点位的组合式导体。如配电箱为 8 位，则使用 (8+1) 位的零排 (N) 或接地排 (PE)，一般零排 (N) 和接地排 (PE) 的规格尺寸相

同，只是因为功能及安装位置不一样，照明箱中的名称也不一样，在金属材料箱体中，零排（N）一定要与箱体绝缘，要采用绝缘支撑件支撑，而接地排（PE）则不应装有绝缘底座。在塑料材料箱体中，为了美观，也可采用带有绝缘底座的零排（N）、接地排（PE）。

3.6.3 绝缘件

照明箱中的绝缘件包括绝缘子、绝缘安装支架等（依工

艺要求决定），在照明箱标准中，对所用的绝缘件提出了严格的测试要求，这些要求是：

- （1）验证绝缘材料的耐热性。
- （2）验证绝缘材料对内部电作用引起的非正常热和着火的耐受能力。

具体试验方法、试验设备、检测仪器及合格判定见第 6 篇第 5 章“配电板试验”。

第6章 建筑工地用成套设备(ACS)

1 简述

本章所介绍的建筑工地用成套设备是低压成套开关设备和控制设备中的一个部分,缩写 ACS。建筑工地用成套设备(ACS)指公众一般不进入的临时工作场地,以及建筑施工、安装、修理、改建、地产(建筑物)拆除、土木工程(公共建筑)、挖掘或任何其他类的工作场地用低压成套开关设备。此类成套设备可以是运输式的(半固定式的)或可迁移式的。

一个 ACS 是由一个进线单元和一个或几个出线单元组成,有的 ACS 还包含有计量箱单元和变压器单元,其箱体用金属或绝缘材料制作,内部安装一个或多个开关、接触器和其他电器控制设备及其附件,通过母线和绝缘导线将这些元器件、附件进行电气的、机械的连接成一组成套设备。

以下列出几种建筑工地用成套设备(ACS)的典型样品:图 3.6-1 所示为总电源配电箱,图 3.6-2 所示为计量配电箱,图 3.6-3 所示为插座箱。

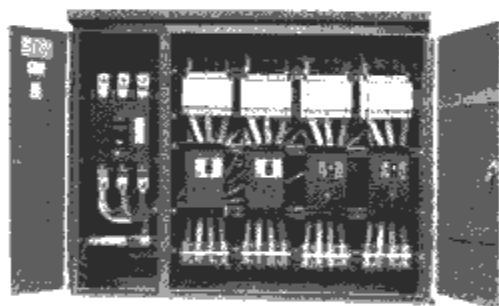


图 3.6-1 总电源配电箱

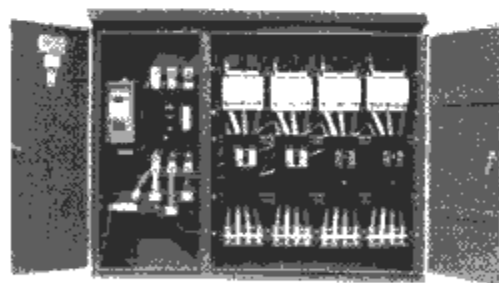


图 3.6-2 计量配电箱

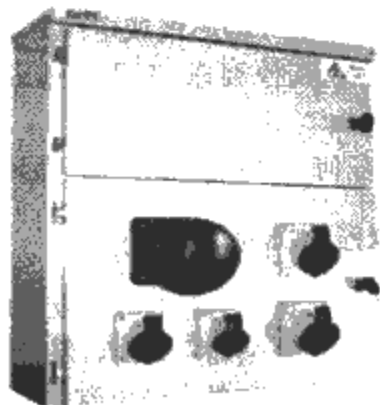


图 3.6-3 插座箱

2 建筑工地用成套设备(ACS)使用环境

2.1 正常使用条件

(1) 周围空气温度。建筑工地用成套设备(ACS)正常使用在周围空气温度不超过 $+40^{\circ}\text{C}$,且 24h 内的平均温度不超过 35°C ,最低温度为 -25°C 的条件下。

(2) 大气条件。用于户外,最高温度为 $+25^{\circ}\text{C}$ 时,相对湿度短时可达 100%。

(3) 污染等级。属于工业用途的建筑工地用成套设备(ACS)适用于污染等级 3 或污染等级 4。

(4) 海拔。建筑工地用成套设备(ACS)安装场地海拔不得超过 2000m。

2.2 特殊使用条件

(1) 温度值、相对湿度或海拔高度与正常使用条件不同。

(2) 在使用中,温度或/和气压急剧变化,以至在成套设备内易出现异常凝露。

(3) 空气被尘埃、烟雾、腐蚀性微粒、放射性微粒、蒸汽或盐雾严重污染。

(4) 暴露在强电场和强磁场中。

(5) 暴露在高温中,如太阳的直射或火炉的烘烤。

(6) 受霉菌或微生物的侵蚀。

(7) 遭受强烈的振动或冲击。

3 建筑工地用成套设备(ACS)分类

3.1 可移动性

建筑工地用成套设备(ACS)是可运输性(半固定式)或可移动性的,也就是说此类 ACS 设备不是永久固定地用于一个位置上,使用期间,在一个场地可移动到另一个场地,当设备移动到另一个位置时,首先要断开电源再移动,如果现场需要带电移动的,则有一种移动式 ACS 可以在不间断电源情况下,随工程的进展而移动。

3.2 功能分类

3.2.1 进线及计量用 ACS

进线及计量用 ACS 应安装于工地用成套设备的电源侧一端,并用来进行线路连接,既可以连接在公共主干线上,也可以连接在工地的发电机上,同时可作为计量电能消耗的计量设备。

3.2.2 主配电 ACS

主配电 ACS 应连接在进线及计量装置的负荷端,工地上各部分的供电电缆与之相连接。

3.2.3 配电用 ACS

配电用 ACS 应连接在从进线及计量装置或从主配电 ACS 中引出的电缆末端,并且连接在向其他 ACS 或机器供给照明电和动力电的配电电路上。

3.2.4 变压器 ACS

变压器 ACS 主要由一个或多个变压器装置组成的。

3.2.5 终端配电用 ACS

终端配电用 ACS 连接在较大的 ACS 的负载端, 为便携式电动工具和其他的用电设备提供电源。

3.2.6 插座出线式 ACS

插座出线式 ACS 设备的所有出线口都是插座出线电源。

4 主要技术要求

ACS 的产品标准是 GB 7251.4—2006/IEC 60439—4; 2004《低压成套开关设备和控制设备 第4部分: 对建筑工地用成套设备(ACS)的特殊要求》。

4.1 设计与结构

4.1.1 机械设计

ACS 应由能承受一定的机械、电气及热应力的材料构成, 此材料还应能经得起正常使用时可能遇到的潮湿影响。为了确保防腐, ACS 应采用防腐材料或在裸露的金属材料表面上涂上防腐层的方法来防腐, 同时还要考虑使用及维修条件。所有器件都应置于配备活动面板、盖板或门的外壳内, 外壳及隔板包括门的闭锁器件, 都应有足够的强度, 以能承受正常使用时所遇到的应力, 与外部电缆的所有连接都应是可拆卸或插接式的, 插座应符合相关标准, 其额定电流值至少为 16A, ACS 中的电气元件和电路布置应便于操作, 电缆入口、盖板等应达到规定的防止触电的防护等级。

4.1.2 电气间隙和爬电距离

电气间隙和爬电距离应符合 GB 7251.1 的规定, 机械设施是绝缘的则例外。充分考虑使用条件下的电气间隙、爬电距离和耐冲击电压。

4.1.3 介电性能

介电性能应符合 GB 7251.1 的规定。以额定耐冲击电压值为基础进行绝缘配合是最优选的。

4.1.4 隔开的电路之间的间隙

确定隔开的电路之间的电气间隙、爬电距离和固态绝缘的尺寸时应选用最大的电压额定值。

4.1.5 外接导线端子

(1) 应符合 GB 7251.1 的规定, 制造商应指明端子是适合于铜导体、铝导体或两者都适合。

(2) 制造商与用户之间无专门协议情况下, 端子应能适用于连接随额定电流而定的最小至最大截面的铜导线和电缆。

(3) 制造商与用户无其他协议, 在带中性导体的三相电路中, 中性导体的端子应允许连接具有下述载流量的铜导线。

1) 如果相导线的截面尺寸大于 10mm^2 , 则中性导体的载流量等于相导线的载流量一半, 其截面积最小为 10mm^2 。

2) 如果相导线的截面尺寸等于或小于 10mm^2 , 中性导体的载流量则等于相导线的载流量。

3) 电缆入口、盖板等应设计成在电缆正确安装好后, 能达到所规定的防触电措施和防护等级。用于电缆设施入口的部件由制造厂规定, 并在其说明书上指出。

4) 端子标识应符合 IEC 60445《人机接口、作标记和识别的基本与安全原则, 电器端子和用相应符号标志的接线端子的识别方法(包括字母数字标志识别通则)》的规定。

4.1.6 防腐蚀

ACS 的防腐蚀措施应采用适合的防腐材料或在裸露的

表面上涂上防腐层的方法, 同时还要考虑使用及维修条件。应采用第 6 篇叙述的试验方法进行验证, 验证其在正常使用条件下和在严重污染条件下耐腐蚀能力。

4.1.7 机械强度

每个 ACS 都应配备支撑件、固定部件(如带铰链、不带铰链的脚架和支柱), 以使其能够就位于一个水平面上, 或应配备一套部件以将其固定在垂直的墙上, 支撑部件应连接在外壳式支撑框架上。

ACS 的结构设计应能使其承受加速度峰值 500m/s^2 、持续时间为 11ms 的正弦半波的单脉冲的机械振动(相当于未捆绑好的设备经过长时间的公路或铁路运输)。ACS 还应能承受 6J 能量的冲击, 即相当于工地的机械手动器械的撞击。

4.2 外壳防护

外壳防护应符合 GB 7251.1 的规定, 由 ACS 提供的防止触及带电部件, 当所有的门板闭合且所有的活动门板及盖板就位后, ACS 的所有部位的防护等级至少应为 IP44。门里的操作面的防护等级不得低于 IP21, 但要求此门在所有使用条件下能够关闭, 如果此门不能关闭, 操作面的防护等级则至少应为 IP44, 如果出现门里操作防护等级与壳体防护等级不一致时, 制造厂应分别指出它们的防护等级, 如标注“IP43-操作面 IP21”。如果制造厂规定了产品的工作场, 那么制造厂指出防护等级适用于整个 ACS。通风口和排泄口不得降低上面所要求的防护等级。

4.3 温升

ACS 的温升应符合 GB 7251.1 的规定。

4.4 电击防护

4.4.1 直接接触的防护

(1) 所有直接接触的防护应从 ACS 的设计和结构上获得。

(2) 所有 ACS 的设计应使元件如插座, 与其匹配的插头的机械损坏减小到最低程度。

(3) 所有外表面的防护等级应不小于 4.2 条的规定, 提供保护的机械设施和受其保护的带电部件之间的距离不得小于规定的电气间隙和爬电距离。

4.4.2 间接触电的防护

(1) 应由用户负责指出下述规定中所选择的防护措施, 另外要考虑 IEC 60364-7-704 给出的整个装置对间接触电的防护措施。

(2) 如 ACS 外壳作为保护电路的一部分时应满足下述条件:

1) 应保持电的连续性。

2) 导电能力至少等于下面的说明: ACS 的每一个导体, 当它不是电缆中的一根芯线或电缆外壳时, 其截面积应不小于 2.5mm^2 , 其他要求等同于对成套开关设备的要求。

3) 应能够在任何一个预定分接点连接附加的保护导体。

4.5 短路保护电器的协调

GB 7251.1 在短路保护电器的协调方面的要求也适用于 ACS。并补充要求: 在合闸确定之前, 保护器件的配合问题应由制造商与用户协商, 如果未经协商, 制造厂的说明书可以代替此类合同。

4.6 ACS 内装元件

GB 7251.1 中对内装元件的要求同时也适用于 ACS, 补充:

(1) 不同额定电流或电压的插头应是不可互换的, 以免误接。

(2) 三相插座的接线应保持同样的相序。

4.7 用挡板及隔板进行 ACS 内部隔离

只有相同电源的设备才能安装在相同的外壳内, 控制电路、信号电路及备用电源例外, 但是外壳内功能单元的额定电压可以不同。

4.8 电气连接母线电缆导线

GB 7251.1 在电气连接母线电缆导线方面的要求也适用于 ACS。

4.9 对电子设备供电电路要求

(1) GB 7251.1 中对电子设备的条款同样也适用于 ACS。

(2) 如果工地的条件比 GB 7251.1 规定的更加严酷、恶劣, 就形成了特殊工作条件, 此时电子设备及其他供电设备应由 ACS 的制造厂和电子设备的制造厂协商确定。

4.10 ACS 特性

4.10.1 一般要求和功能

(1) 一个 ACS 由一个或几个出线单元组成, 并且还可以包含有计量单元和变压器单元, 出线单元可以提供下述不同功能: 向其他 ACS、照明电器、机床、电动工具或其他工地设备供电。

(2) 各种类型的 ACS 的定义在 GB 7251.4 中已给出。

4.10.2 电源进线及计量用 ACS

电源进线及计量用 ACS 一般包括:

(1) 一个能容纳供电电缆和计量装置的具有终端功能的隔室。

(2) 出线电缆有过载保护与短路电流保护装置。

上述隔室应有自己的入口设施(盖板、闸板、门等)。

4.10.3 进线单元

电缆的连接设施(指端子、连接设施、连接器或插头和插座配件)应适合成套设备的电流等级。应提供隔离装置和一个过流保护器件, 应有方法保障隔离器能处于断开位置, 如果成套设备是由其他装置供电并具备足够的保护, 则不需配备过流保护器件。

4.10.4 计量单元

如果使用计量单元测量其电能消耗向供电部门付费, 其计量单元应符合供电部门的要求。如果计量单元不用于上述目的, 则无须要求。

4.10.5 出线单元

每个单元包括一个或多个出线单元:

(1) 应具有隔离、复合开关、过电流保护和间接接触的防护装置。这些功能可以由一个和多个元器件提供。

(2) 不使用钥匙或工具, 应易于操作负荷开关。

(3) 开关器件的所有电极, 包括所有相导体应同时动作, 中性导体和保护导体除外。但在需要断开中性导体的电路系统中, 应装设相线和中性导体一起动作的电器; 中性导体上严禁安装可以单独操作的单极开关电器。

(4) 插座的防护应具有直接接触防护和间接接触防护。

4.10.6 主配电 ACS

(1) 一般配置。此成套设备有一个进线单元和数个出线单元组成。

(2) 进线单元。电缆的连接设施(指端子、连接设施、连接器或插头和插座配件)应与此单元的电流额定值相匹配。但应具有一个隔离装置和一个过流保护装置。并应具有隔离装置锁定在分断位置的设施。但是, 如果主配电 ACS 是由进线及计量用 ACS 供电的, 过电流保护器件则不是必需的。额定电流至少为 630A。

(3) 出线单元。每个单元包括一个或几个出线电路。

1) 应具有隔离开关、负荷开关、过电流保护和间接防护措施。

2) 不使用钥匙或工具, 应易于操作负荷开关。

3) 开关器件的所有电极, 包括所有相导体应同时动作, 中性导体和保护导体除外。但在需要断开中性导体的电路系统中, 应装设相线和中性导体一起动作的电器。

4) 插座的防护应具有直接接触防护和间接接触防护。

4.10.7 配电 ACS

(1) 一般配置。此类 ACS 由一个进线单元和数个出线单元组成。

(2) 进线单元。电缆的连接设施(指端子连接设施、连接器或插头和插座配件)应与此单元的电流额定值相匹配。但应有一个隔离装置和一个过流保护装置。并应具有隔离装置锁定在分断位置的设施。如果该配电成套设备在进线电源和测量用成套设备的负载侧上, 或在主配电成套设备的负载侧上, 那么过流保护器件可以不选用。电流额定值应大于 125A, 但不超过 630A。

(3) 出线单元。每个单元包括一个或数个出线电路, 4.10.5 条的要求适用于每个出线回路, 通常用来连接手持式电动工具, 类似便携式装置的插座。其额定电流不超过 32A, 应采用额定剩余动作电流不超过 30mA 的剩余电流动作保护器进行保护。多条插座电路可以用同一剩余电流动作保护器进行保护。其中插座的防护应按照 GB 16895.7—2000《建筑物电气装置 第7部分: 特殊装置或场所的要求 第704节: 施工和拆除场所的电气装置》防止直接接触或间接接触。防止过电流, 其保护器件的额定电流不超过插座的额定电流。一个保护器件可以保护多个插座。

4.10.8 变压器单元

(1) 一般布置。此单元可以包括一个低压/超低压(LV/ELV)变压器和/或低压/低压变压器单元(LV/LV)构成。

(2) LV/ELV 单元。此单元可以是低压/安全超低压或低压/保护超低压型, 主要包括:

1) 初级电路上的保护和控制装置。

2) LV/ELV 变压器, 它应具有各自独立的线圈, 以保证额定初级电压不超过 1000V 时初级电路和次级电路的隔离。

3) 用于出线电缆的保护和控制装置。

对于此型号单元的 ELV 接线法, GB 14821.1—1993《建筑物的电气装置电击防护》中的要求适用。

(3) LV/LV 单元。每个 LV/LV 单元基本包括:

1) 初级电路上的保护和控制装置。

2) LV/LV 变压器, 应符合 GB 13028《隔离变压器和安全变压器技术要求》。

3) 次级电路上的保护和控制装置。

4) 端子或插座的输出。

插座的防护应按照 GB 16895.7—2000 防止直接接触或间接接触。

防止过电流,其保护器件的额定电流不超过插座的额定电流。一个保护器件可以保护多个插座。

如果用电缆将中性点连接在壳体外部接地端子上的话,变压器则不需是隔离变压器。此电缆应用标签标明,标签贴在外壳内尽量靠近端子的地方。在此情况下 1)、3)、4) 的要求也同时适用。

4.10.9 终端配电用 ACS

(1) 进线单元。进线单元应连接在与此单元的电流额定值相符的端子或输入装置(连接器)上。此电流额定值应不大于 125A。并应符合 4.10.6 条要求。

(2) 出线单元。每个单元都包括一个或数个出线电缆。4.10.6 条给出的要求适用。如果终端配电用 ACS 功能包括以上(进线计量 ACS、主配电 ACS、变压器 ACS 等类型功能的 ACS)所提到的成套设备中,那么上述条款是适用的。

4.10.10 插座出线式 ACS

插座出线式 ACS 应是下述两种类型中的一种:

(1) 一种是额定工作电压不小于标称供电电压,而额定频率符合国家标准。

(2) 另一种是工作电压较低,而额定频率不同于供电电源的频率。

此插座出线式 ACS 成套设备可以是移动式的,或者是运输式的,它一般包括以下功能单元:

1) 进线单元。进线电缆应该连接在一个插头或连接器上。此插头或连接器应连接在与其匹配的插座上或固定在此单元的连接装置上。其额定电流不应超过 63A。

2) 出线单元。各出线电缆应单独用插座进行连接,每个插座应有各自的过载保护。插座应按照 4.10.8 要求进行防护。

4.10.11 建筑工地用成套设备(ACS)应提供的有关资料

4.10.11.1 铭牌

每个 ACS 都应配备一个或数个铭牌,这些铭牌应是经久耐用的,并且在装置安装后,应使之位于显而易见的地方。下列(1)~(8)的内容应在铭牌上标出。

(1) ACS 制造厂的名称和商标。

(2) 产品型号名称或识别号,或可以从制造厂那里获得有关资料的其他标志。

(3) GB 7251.4。

(4) 单元的型号和额定电流,以及电流为交流时的额定频率。

(5) 额定工作电压。

(6) 额定绝缘电压。

(7) 短路耐受强度。

(8) 防护等级。

(9) 特殊使用条件。

(10) 外形尺寸。

(11) 质量。

4.10.11.2 安装操作或维修说明书

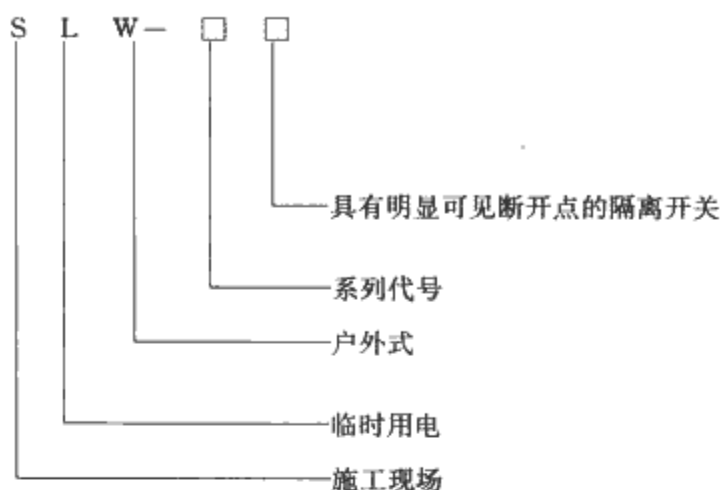
ACS 的制造商应在产品说明书中规定可以与其连接的其他成套设备,应指出系统接地形式的兼容性和/或整个装置内电气保护协调性的要求。

5 典型产品技术参数举例

这里举出典型建筑工地用成套设备(ACS)产品实例,

仅以某配电用建筑工地用成套设备(ACS)为例给出一些产品特征数据。

5.1 产品型号



5.2 产品描述

5.2.1 主要组成部件及特点

由箱体支架、封闭式箱体、元件安装板、插座、断路器、接触器、母线及导线、绝缘支撑件、铭牌等组成。

(1) 操作方式为正面手动操作。

(2) 安装方式为可移动式安装。

(3) 接线方式为固定接线。

5.2.2 主要结构

(1) 箱体与箱门之间铰链连接,右箱门上有小门,小门内焊有隔板,使断路器操作手柄与带电体隔离。

(2) 门上有警示标志。

(3) 外部进出线方式为上进下出。

(4) 保护电路及防护措施。箱内电器元件及 N 排、绝缘子安装在底板上,接地螺钉 M4、PE 排 TMY-40×2mm² 焊接在箱外壳上,箱门与主接地连接为 7×1mm² 软铜编织线。操作电器开关通过隔离、打开小门操作,操作面的防护等级达到 IP21。

(5) 外形尺寸(mm):高 800,宽 1000,深 200。

带檐外形尺寸(mm):高 808,宽 1100,深 208。

5.3 主要技术参数

(1) 额定工作电压为交流 380V/220V。

(2) 额定绝缘电压为 500V。

(3) 额定频率为 50Hz。

(4) 安装类别为Ⅲ。

(5) 材料组别为Ⅲa。

(6) 污染等级为 3 级。

(7) 电气间隙为≥8mm。

(8) 爬电距离为≥10mm。

(9) 主母线额定电流、额定短时耐受电流和额定峰值耐受电流分别为 250A, 6kA, 10.2kA。

(10) 主开关极限短路分断和运行短路分断能力, 30kA。

(11) 主回路额定电流为 250A。

(12) 每个出线单元保护开关的额定电流为 1~2 分支 100A, 3 分支 40A。

(13) 外壳防护等级为装置外壳 IP44, 内部操作面 IP21。

(14) 触电保护类别为 I。

(15) 额定分散系数为 K=0.9。

第7章 动力配电网用电电缆分线箱

1 简述

本章介绍低压开关设备和控制设备的另一户外的、用于公共场所的成套设备——动力配电网用电电缆分线箱（Cable Distribution Cabinets，缩写 CDCs）。

动力配电网用电电缆分线箱（CDCs）是一种用电缆向其他设备分配电能的在户外安装的封闭式成套设备，上述的其他设备不是消耗电能的设备（见图 3.7-1）。

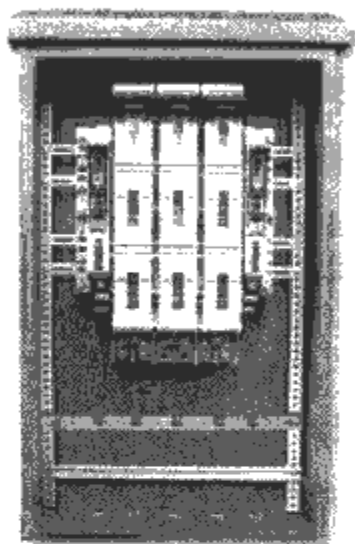


图 3.7-1 动力配电网用电电缆分线箱

2 动力配电网用电电缆分线箱（CDCs）的使用环境

2.1 正常使用条件

（1）周围空气温度。动力配电网用电电缆分线箱（CDCs）正常使用在周围空气温度不超过 $+40^{\circ}\text{C}$ ，且 24h 内的平均温度不超过 35°C ，最低温度为 -25°C 的条件下。

（2）大气条件。用于户外，最高温度为 $+25^{\circ}\text{C}$ 时，相对湿度短时可达 100%。

（3）污染等级。属于工业用途的建筑工地用成套设备（ACS）适用于污染等级 3 或污染等级 4。

（4）海拔。建筑工地用成套设备（ACS）安装场地海拔不得超过 2000m。

2.2 特殊使用条件

（1）温度值、相对湿度或海拔高度与正常使用条件不同。

（2）在使用中，温度或/和气压急剧变化，以至在成套设备内易出现异常凝露。

（3）空气被尘埃、烟雾、腐蚀性微粒、放射性微粒、蒸汽或盐雾严重污染。

（4）暴露在强电场和强磁场中。

（5）暴露在高温中，如太阳的直射或火炉的烘烤。

（6）受霉菌或微生物的侵蚀。

（7）遭受强烈的振动或冲击（遭受运输路途中的振动作为一般使用条件）。

3 产品分类

3.1 按不同安装方式分类

（1）地面安装式电缆分线箱。安装在地面基础上的电缆分线箱，箱上的外接导体入口应适用于电缆的进入。

（2）柱上安装式电缆分线箱。安装在架空电网中的电杆上，该电杆上一般都安装有一个变压器，箱上的外接导线的入口应适合于电缆或绝缘架空线的进入。

（3）悬挂安装式电缆分线箱。用于安装在墙面上的电缆分线箱，其外接导体要适合于电缆的进入，这种 CDCs 的特点是板式结构、简单工具即可组装、母排直接安装在箱体上，选配底座后可为地面安装。

（4）嵌入安装式电缆分线箱。用于安装在墙上的凹槽里，此时的 CDCs 不用来支撑上面那部分墙的质量，其外接导体的入口也要适合于电缆的进入。

3.2 按壳体不同材料分类

（1）金属材料。一般用钢板焊接、组装制作，表面涂敷防腐层涂料，用这种材料制作的壳体必须通过机械强度验证。

（2）绝缘材料。通常用合成材料（玻璃纤维加强不饱和聚酯）制作，该类壳体材料必须通过 UV（紫外线）试验。

3.3 按内装电器元件类别分类

（1）接线端子式。内装分线元件为接线端子。

（2）断路器式。内装分线元件为断路器。

（3）熔断器式。内装分线元件为熔断器，此时选用的熔断器要符合 GB 13539.1—2002《低压熔断器 第 1 部分：基本要求》的一般要求。

（4）刀开关隔离器式。内装分线元件为刀开关隔离器。

（5）刀熔开关式。内装分线元件为刀熔开关。此时选用的熔断器要符合 GB 13539.1 的一般要求，但必须是在它适用于此用途时。

3.4 按不同使用功能分类

（1）电缆分线用。主要用于电缆分接线。

（2）路灯控制箱。除电缆分线外，还完成一定的路灯控制配电功能。

（3）交通信号箱。除电缆分线外，还完成一定的交通信号控制配电功能。

（4）带计量的电缆分箱。除电缆分线外，还可用于计量电能。

（5）临时接线用电电缆分线箱。用于临时建筑工地场合的产品，要求其防护等级 IP54，每个配电回路采用插拔式结构。

4 设计与结构

4.1 机械设计

CDCs 应由能承受一定的机械、电气应力及热应力的材

料构成,此材料还应能经得起正常使用时可能遇到的潮湿影响。外壳、挡板和其他绝缘部件所使用的绝缘材料应具有耐高温和耐火花能力。

为了确保防腐,CDCs应采用防腐材料或在裸露的金属材料表面上涂上防腐层的方法来防腐,同时还要考虑使用及维修条件。所有器件都应置于配备活动面板、盖板或门的外壳内,外壳及隔板包括门的闭锁器件,都应有足够的强度,以能承受正常使用时所遇到的应力,CDCs的机械性能应符合标准。

4.1.1 电气间隙和爬电距离

电气间隙和爬电距离应符合GB 7251.1的规定,机械设施是绝缘的则例外。充分考虑使用条件下的电气间隙、爬电距离和耐冲击电压。

4.1.2 介电性能

介电性能应符合GB 7251.1的规定,以额定耐冲击电压值为基础进行绝缘配合是最优选的。

4.1.3 外接导线端子

(1)应符合GB 7251.1的规定,制造商应指明端子是适合于铜导体、铝导体或两者都适合。

(2)制造商与用户之间无专门协议情况下,端子应能适用于连接与额定电流相适应的最小截面和最大截面的具有铜或铝导体的电缆。

(3)制造商与用户无其他协议,在带中性导体的三相电路中,中性导体的端子应允许连接具有下述载流量的铜导线。

1)如果相导线的截面尺寸大于 10mm^2 ,则中性导体的载流量等于相导线的载流量一半,其截面积最小为 10mm^2 。

2)如果相导线的截面尺寸等于或小于 10mm^2 ,中性导体的载流量则等于相导线的载流量。

(4)电缆入口、盖板等应设计成在电缆正确安装好后,能达到所规定的防触电措施和防护等级。用于电缆设施入口的部件由制造厂规定并在其说明书上指出,根据制造商与用户之间协议,CDCs可配有开口以便于电缆的临时连接。

(5)端子标示应符合GB/T 4026—1992《电器设备接线端子和特定导线线端的识别及应用字母数字系统的通则》的规定。

4.1.4 防腐蚀

CDCs的防腐蚀措施应采用适合的防腐材料或在裸露的表面上涂上防腐层的方法,同时还要考虑使用及维修条件。应采用第6篇叙述的试验方法来验证其在正常使用条件下和在严重污染条件下耐腐蚀能力。

4.1.5 机械强度

CDCs的外壳顶部应能承受 $8500\text{N}/\text{m}^2$ 重力,持续时间5min,前部和后部的顶角应能承受1200N的力,持续时间5min。外壳的每个垂直面能耐受15kg的冲击力。

4.2 外壳防护

外壳防护应符合GB 7251.1的规定,由CDCs提供的防止触及带电部件,当所有的门板闭合且所有的活动门板及盖板就位后,CDCs的所有部位的防护等级至少应为IP34D。如果制造厂规定了产品的工作场,那么制造厂指出防护等级适用于整个CDCs。通风口和排泄口不得降低上面所要求的防护等级。

4.3 温升

CDCs的温升应符合GB 7251.1的规定。

4.4 电击防护

4.4.1 直接接触电的防护

(1)所有直接接触的防护应从CDCs的设计和结构上获得。

(2)所有外表面的防护等级不应小于4.2条的规定,提供保护的机械设施和受其保护的带电部件之间的距离不得小于规定的电气间隙和爬电距离。

4.4.2 间接接触电的防护

(1)应由用户负责指出下述规定中所选择的防护措施,另外要考虑IEC 60364-4-41中规定的整个装置对间接接触的要求,如采用保护导体。

(2)如CDCs外壳作为保护电路的一部分时应满足下述条件:

1)应保持电的连续性。

2)导电能力至少等于下面的说明:CDCs的每一导体,当它不是电缆中的一根芯线或电缆外壳时,其截面积应不小于 2.5mm^2 ,其他要求等同于对成套开关设备的要求。

4.5 短路保护电器的协调

GB 7251.1在短路保护电器的协调方面的要求也适用CDCs。并补充要求:在合闸确定之前,保护器件的配合问题应由制造商与用户协商,如果未经协商,制造厂的说明书可以代替此类合同。

4.6 CDCs内装元件

GB 7251.1中对内装元件的要求同时也适用于CDCs,并补充:

(1)熔断器应符合GB 13539.1的一般要求。

(2)CDCs的出线单元结构应使其能够可靠的进行挂线或短接,这样可保证防护等级。

4.7 电气连接母线电缆导线

GB 7251.1在电气连接母线电缆导线方面的要求也适用于CDCs。

5 主要技术要求

动力配电网用电缆分线箱产品符号GB7251.5。

(1)防护等级。至少为IP34D。

(2)封闭式。防尘、全封闭、耐腐蚀,内设防尘网,防护等级IP54,适合于多飞尘环境。

(3)防雨散热式。顶盖上方及箱体两侧都设有散热孔,孔外再装防护网,不但保证整体防护功能,还可进行有效散热,防护等级IP34D,适合于气候炎热又多雨的环境。

6 动力配电网用电缆分线箱(CDCs)应提供的有关资料

6.1 铭牌

每个CDCs都应配备一个或数个铭牌,这些铭牌应是经久耐用的,并且在装置安装后,应使之位于显而易见的地方。下列(1)~(8)的内容应在铭牌上标出。

(1)CDCs制造厂的名称和商标。

(2)产品型号名称或识别号,或可以从制造厂那里获得有关资料的其他标志。

- (3) GB 7251.5。
- (4) 型号和额定电流，以及电流为交流时的额定频率。
- (5) 额定工作电压。
- (6) 额定绝缘电压。
- (7) 短路耐受强度。
- (8) 防护等级。
- (9) 特殊使用条件。
- (10) 外形尺寸。
- (11) 质量。

6.2 安装操作或维修说明书

制造商应在产品技术文件、说明书中规定成套设备及设备内的电器元件的安装、操作和维护条件。必要时上述文件应给出推荐的维修范围和维修周期。

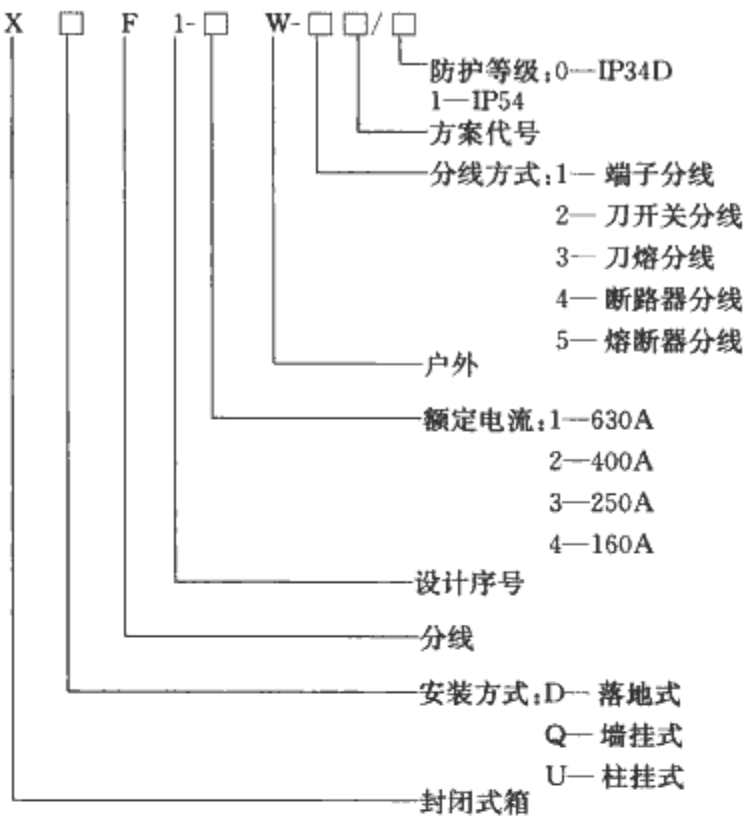
7 典型产品介绍

这里举出的典型动力配电网用电缆分线箱（CDCs）实例，是由天津电气传动设计研究所负责组织的全国联合设计、共同开发研制的新型产品。

7.1 产品型号

7.2 产品结构和安装方式

- (1) 主要组成部分。产品主要由箱体（顶盖、箱身、门和底板、箱体支架）、刀熔开关、母线及绝缘导线、绝缘支撑件、铭牌等组成。
- (2) 壳体材料。壳体材料是由不锈钢或镀锌钢板加喷涂制成。
- (3) 产品根据性能分有可防腐、防尘型、可防雨、散热型。
- (4) 根据安装方式分有落地式、墙挂式、柱挂式。



7.3 主要技术指标

- (1) 额定工作电压（V）为交流 220/380。
- (2) 额定绝缘电压（V）为 500。
- (3) 额定工作电流（A）为 630，400，250，160。
- (4) 额定输出电流（A）为 400，250，160，120，1000，80，60，40。
- (5) 额定频率（Hz）为 50。
- (6) 防护等级为 IP34D、IP54。
- (7) 海拔高度（m）为 2000。
- (8) 污染等级为 3 级。
- (9) 分线方案设计为断路器分线、刀开关分线、刀熔开关分线、熔断器分线、端子分线和母线直接分线等多种方案。

第8章 智能型低压成套设备

1 简述

智能型低压成套设备通常是指：采用标准的现场总线或其他数字通信方式将具有通信功能的低压智能设备（如智能型断路器、智能型保护控制装置、智能型测控装置及智能仪表等设备），由通信电缆相互连接起来，通过控制器或上位机（主控系统：PLC 或 PC 系统）实现对现场设备、电网、整个配电系统或其他控制器（从站）等的数据采集和运行状态的远程遥控、遥测、遥调、通讯中的（“四遥”）部分或全部功能，以及系统数据的存储分析和设备运行管理等功能的低压成套设备。GCKZ 是典型的智能型低压成套设备，见图 3.8-1。

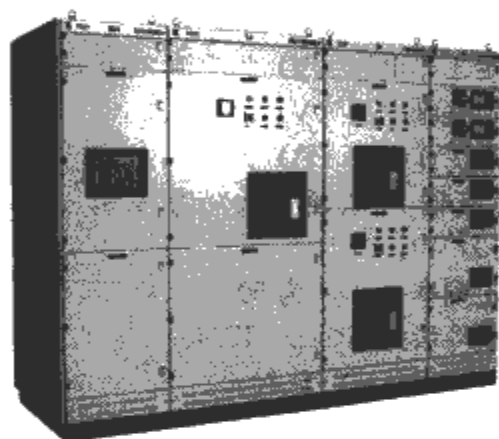


图 3.8-1 智能型低压成套设备

智能型低压成套设备和传统低压成套设备最主要的区别是：智能型低压成套设备采用可通信智能型保护、测量及控制设备，取代了传统热磁保护设备、指针表及继电器控制设备，提高了保护动作的准确性、测量的精确性及控制的可靠性，同时运用计算机技术和现场总线通信技术很好地实现了配电系统的远程智能化监控管理功能。

2 智能型低压成套设备的系统功能

2.1 智能终端设备

智能型低压成套设备应当采用具有现场总线通信功能的智能型保护、测量及控制设备，它主要分一次设备和二次设备，一次设备如智能型框架断路器、智能型塑壳式断路器，二次设备如智能型 PC 测控装置、智能型测控仪表、智能型电动机控制器等。同时要求设备采用的通信协议是标准的、开放的，如采用 Profibus-DP、DeviceNet、Modbus-RTU、CAN（见图 3.8-2）等标准通信协议标识。



图 3.8-2 总线标识

(a) Profibus-DP; (b) Modbus-RTU;
(c) DeviceNet; (d) CAN

2.2 遥控功能

通过上位机对智能型低压成套设备各电气回路或电器设备实现远程操作控制功能（具体各回路的可遥控的功能应根据设计需要确定）。

(1) 配电回路。控制断路器的分闸、合闸。

(2) 电动机控制电路。电动机的起动、停车、复位等操作。

2.3 遥测功能

通过上位机远程采集智能型低压成套设备各电气回路的电量参数（具体可遥测的参数应根据设计需要确定）。

(1) 主进线电路。三相电流、三相电压、有功功率、功率因数、有功电能、无功电能等。

(2) 配电电路。三相电流、三相电压（相电压/线电压）、有功功率、有功电能等。

(3) 出线回路。三相或单相电流、有功功率、有功电能等。

(4) 电动机回路。三相或单相电流、有功功率等。

(5) 补偿回路。功率因素（实际值/设定值）等。

(6) 其他。电网频率、谐波分量等。

图 3.8-3 和图 3.8-4 所示为“某电厂中低压智能化配电监控管理系统”主界面图（部分）。该系统中 10kV 系统采用具有通信接口的 DigiPro II 系列微机保护监控综合装置实现进线和馈线回路断路器的保护、电参量测量、远程控制和运行状态监视；400V 系统采用具有 Modbus 总线通信接口的智能断路器测控装置实现进线和馈线回路断路器的远程控制、电参量测量和运行状态监视。

2.4 遥调功能

通过上位机远程调整智能型低压成套设备各个智能终端的可变参数（如断路器保护参数）。

图 3.8-5 所示为智能型万能式断路器 CW2/H 主要保护参数远程下载和查看界面。

2.5 通信功能

通过上位机对智能型成套设备各电气回路或电器设备实现以下遥信功能，具体可遥信的功能应根据设计需要确定。图 3.8-6 所示为现场设备故障报警指示画面。

(1) 通信状态。

(2) 报警/故障信息。

(3) 开关状态、补偿电容器投切状态。

(4) 设备操作次数/运行时间等。

2.6 维护管理功能

智能型成套设备的通信系统能通过上位机对各从站实现以下维护管理功能：

(1) 智能型成套设备的工程资料及设备信息管理。

(2) 各回路的挂牌检修功能。

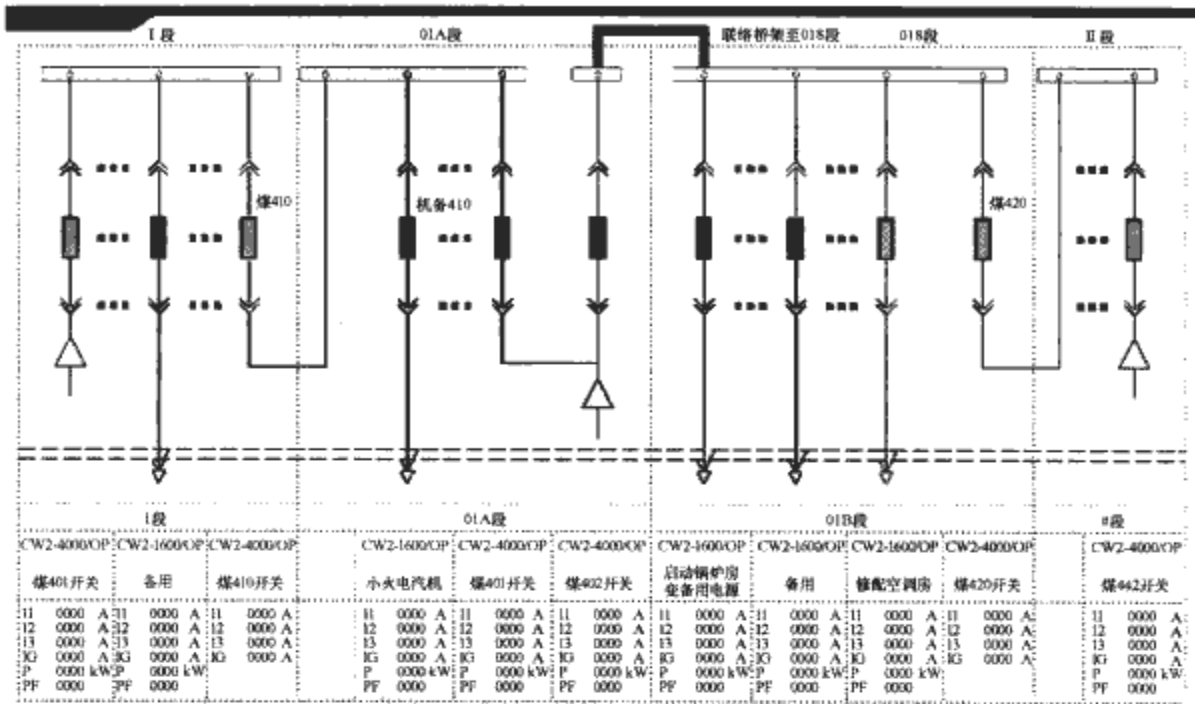


图 3.8-3 智能化监控系统 1

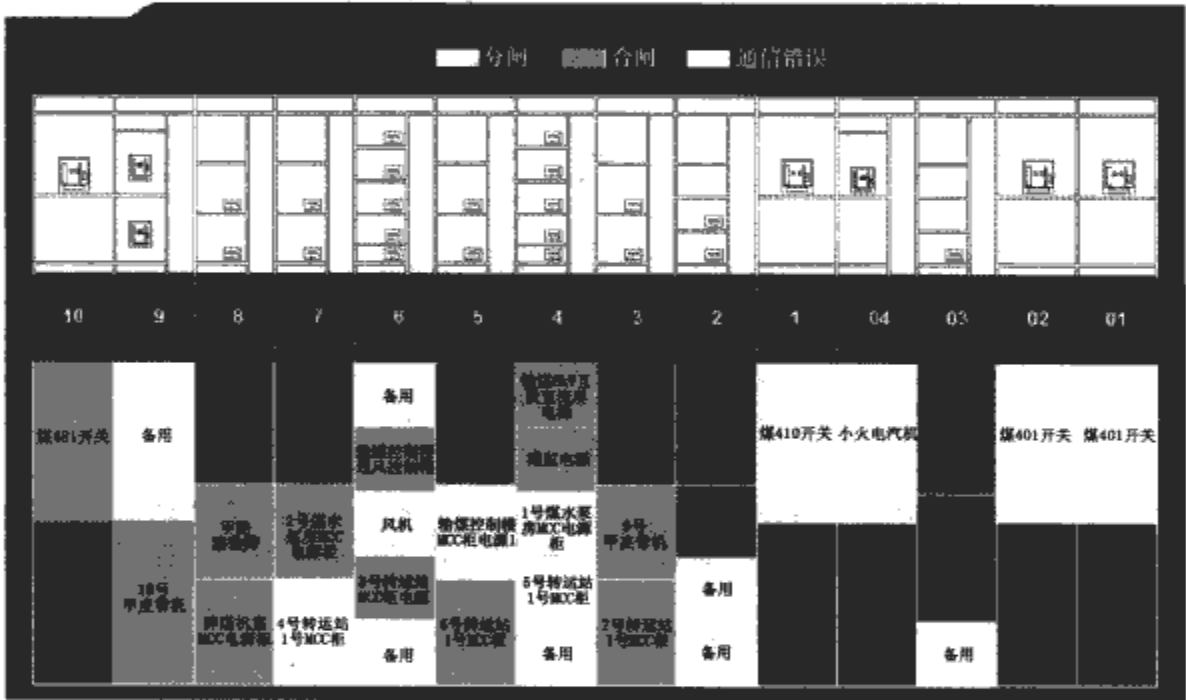


图 3.8-4 智能化监控系统 2

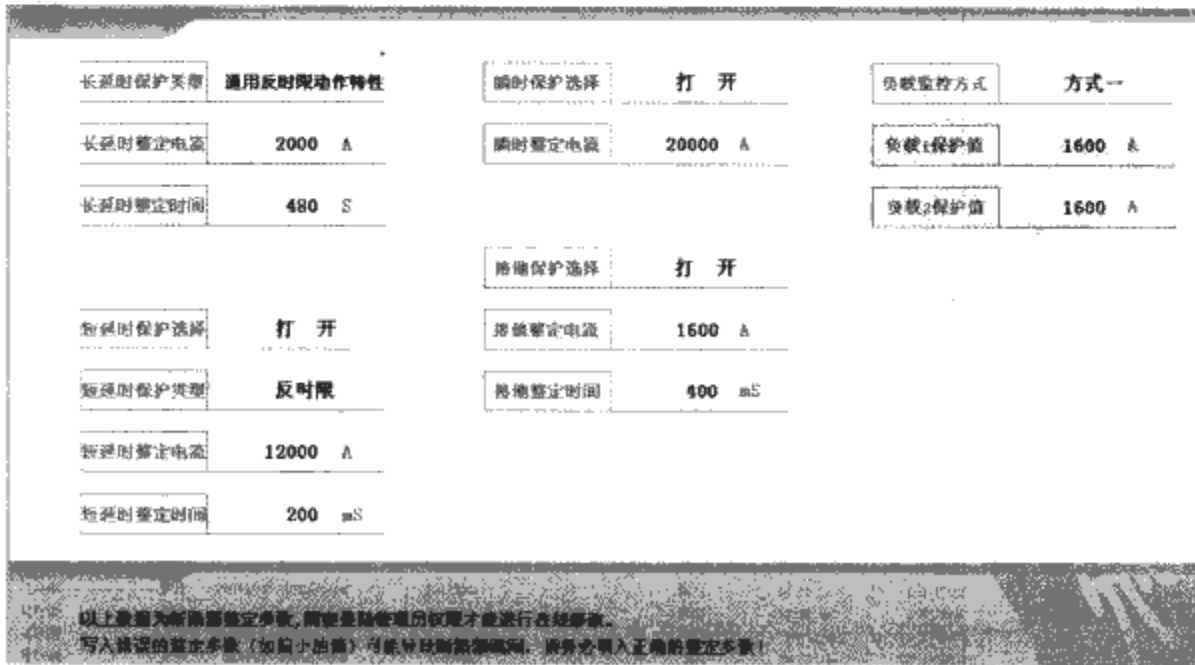


图 3.8-5 调速功能

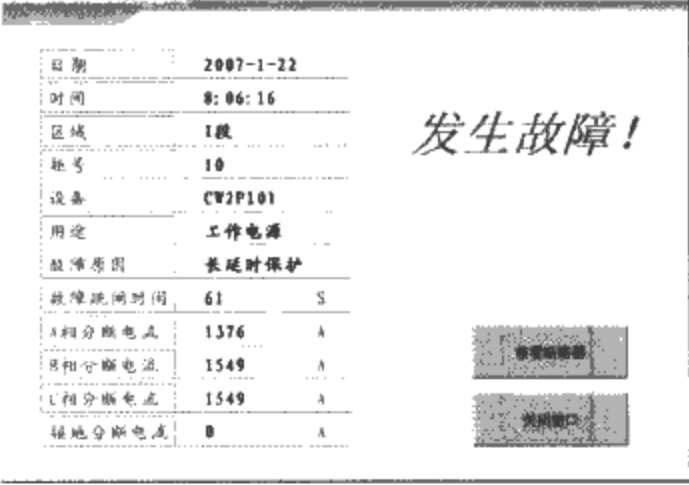


图 3.8-6 通信功能故障报警指示画面

- (3) 操作事件记录功能。
- (4) 报警管理。
- (5) 故障管理。
- (6) 电能管理。
- (7) 负荷分析。
- (8) 报表打印等（包括实时报表、日报表、月报表及年报表）。

图3.8-7 所示为系统故障记录管理功能界面，图3.8-8 所示为系统操作记录管理功能界面，图 3.8-9 所示为系统实时报表功能界面，图 3.8-10 所示为系统日报表功能界面。

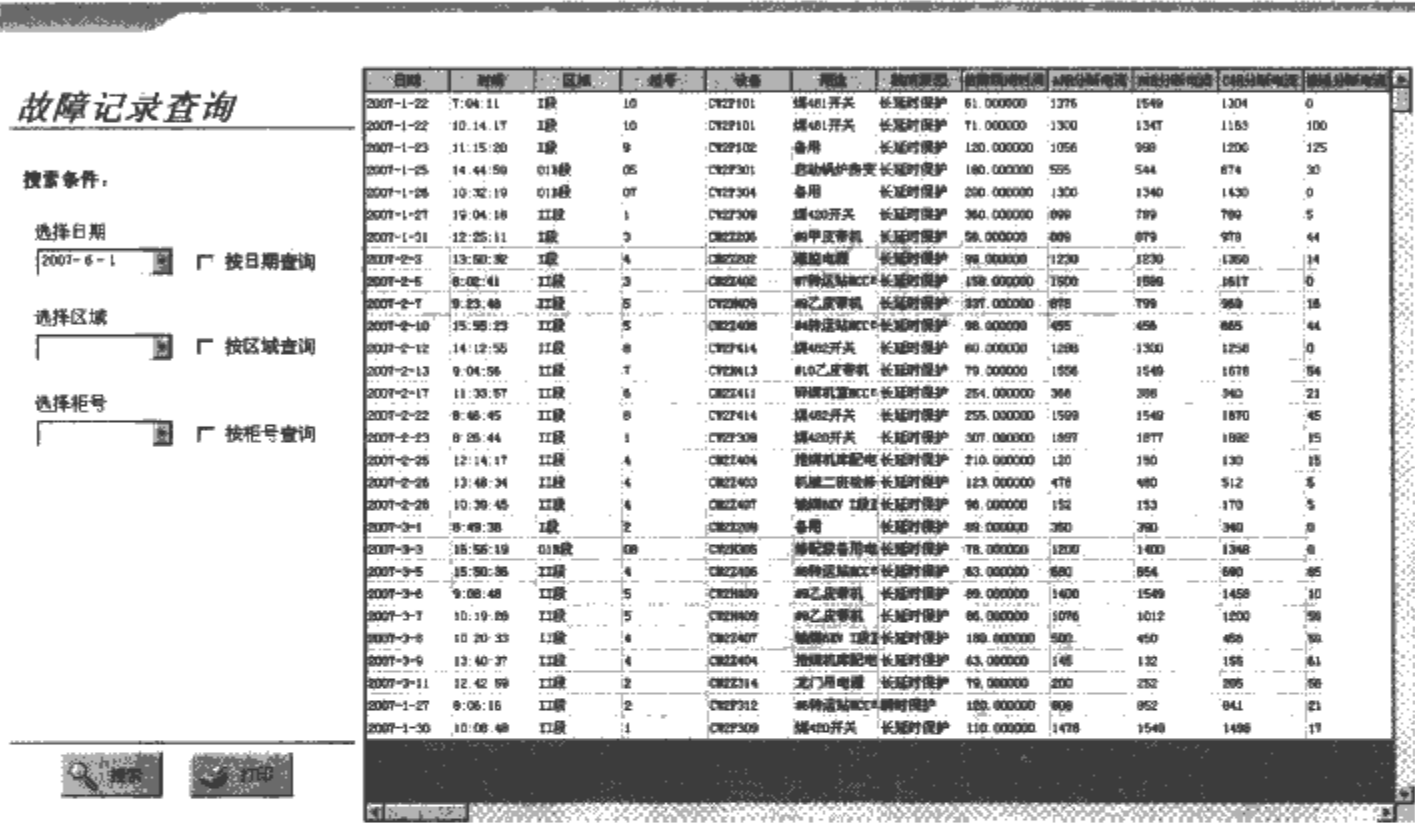


图 3.8-7 故障记录管理功能

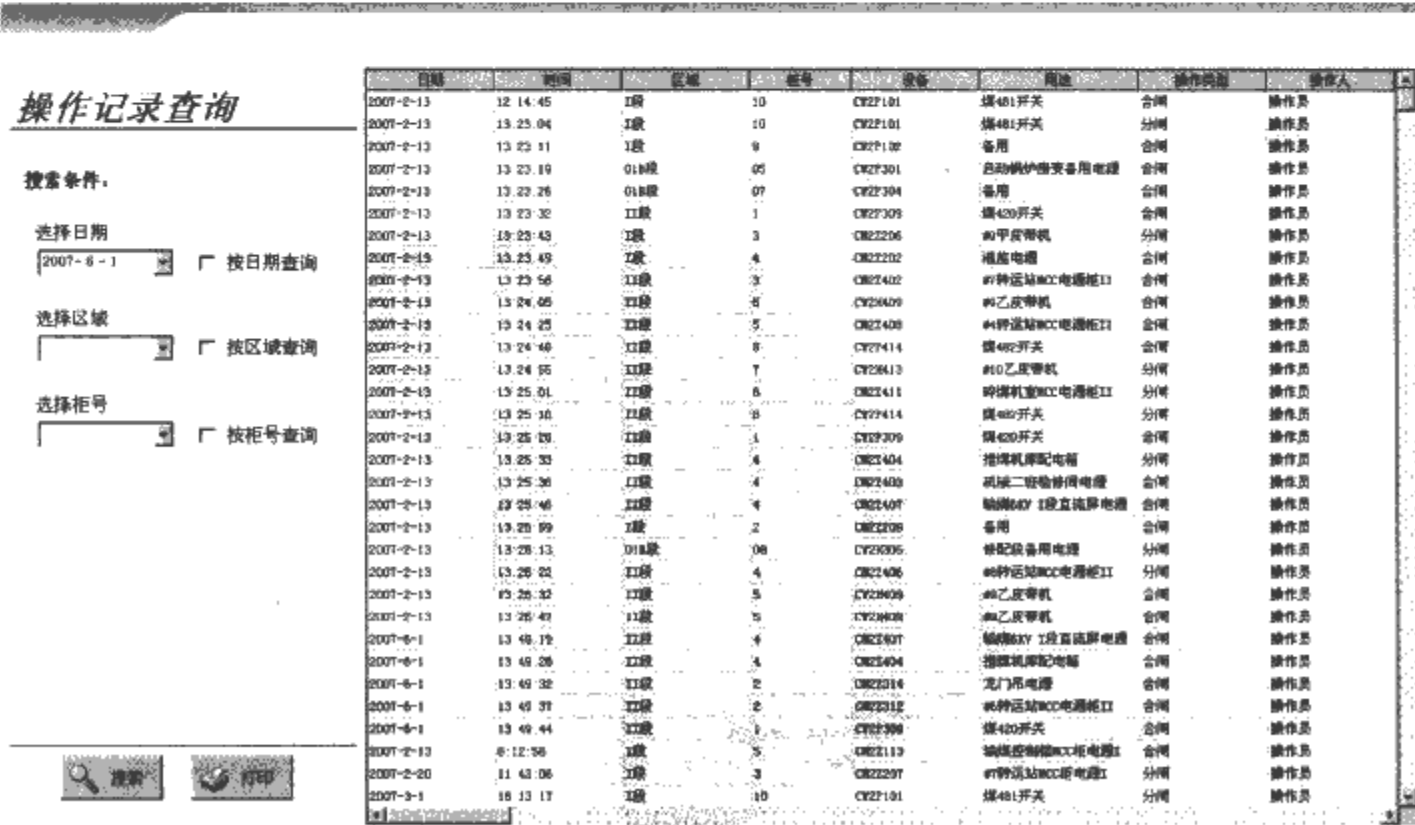


图 3.8-8 操作记录管理功能

实时报表

时段	I段		01A段			01B段			II段
序号	10	9	04	02	01	06	07	10	8
设备	CW2P101	CW2P102	CW2P211	CW2P213	CW2P214	CW2P301	CW2P304	CW2P306	CW2P414
用途	煤401开关	备用	小火电汽机	煤401开关	煤402开关	磨401磨煤... 磨402磨煤...	备用	磨403磨煤...	煤402开关
I1	685	0	453	476	321	283	0	74	96
I2	680	0	420	488	317	291	0	81	93
I3	665	0	445	491	338	293	0	75	102
Σp	126653	0	130403	127216	44560	20033	0	25533	25709
PP	0.853	1.000	0.871	0.881	0.968	0.899	1.000	0.886	0.893

图 3.8-9 实时报表功能界面

日报表

时段	I段		01A段			01B段			II段										
序号	10	9	04	02	01	05	07	10	8										
设备	CW2P101	CW2P102	CW2P211	CW2P213	CW2P214	CW2P301	CW2P304	CW2P306	CW2P414										
用途	煤401开关	备用	小火电汽机	煤401开关	煤402开关	磨401磨煤机... 磨402磨煤机...	备用	磨403磨煤机...	煤402开关										
00:00	189	123042	0	0	481	126890	450	121718	342	40097	289	10826	0	0	74	24681	82	24976	
01:00	330	123104	0	0	467	125173	462	122046	354	40984	281	10983	0	0	74	24724	82	25004	
02:00	422	123386	0	0	480	126458	480	122327	345	41010	287	17049	0	0	81	24787	86	25054	
03:00	768	123730	0	0	484	126940	478	122408	342	41266	283	17306	0	0	80	24880	83	25062	
04:00	201	123834	0	0	481	126922	476	122485	318	41401	287	17482	0	0	74	24851	82	25088	
05:00	202	123971	0	0	481	126386	476	123163	338	41886	286	17417	0	0	75	24904	83	25116	
06:00	218	124085	0	0	481	126880	478	123442	348	41794	281	17719	0	0	81	24936	82	25161	
07:00	856	124476	0	0	434	126844	431	123697	847	42041	479	17846	0	0	74	24978	83	25187	
08:00	162	124603	0	0	562	127118	537	123867	376	42278	281	18183	0	0	80	25021	86	25198	
09:00	173	124881	0	0	550	127430	544	124284	347	42487	284	18352	0	0	74	25060	87	25249	
10:00	420	124971	0	0	538	127755	533	124586	362	42793	298	18529	0	0	74	25107	84	25289	
11:00	179	125160	0	0	483	128071	474	124811	356	42918	283	18705	0	0	74	25148	81	25334	
12:00	163	126243	0	0	494	128360	488	125180	321	43118	241	18887	0	0	81	25180	81	25378	
13:00	175	126314	0	0	495	128450	480	125483	309	43328	285	19036	0	0	78	25230	88	25424	
14:00	618	126658	0	0	495	128842	489	125772	373	43544	300	19214	0	0	75	25278	81	25479	
15:00	716	126866	0	0	528	129230	503	126081	344	43783	273	19383	0	0	75	25321	84	25512	
16:00	187	126101	0	0	495	129522	491	126340	307	43962	285	19553	0	0	75	25364	81	25566	
17:00	176	126374	0	0	588	129813	495	126632	346	44170	289	19721	0	0	81	25407	80	25602	
18:00	704	126360	0	0	504	130108	457	126905	338	44388	285	19878	0	0	78	25449	82	25648	
19:00	688	126603	0	0	472	130403	464	127218	317	44540	244	20035	0	0	75	25491	77	25674	
20:00	688	126814	0	0	464	130671	458	127481	334	44715	405	20210	0	0	75	25533	75	25709	
21:00	584	127030	0	0	488	130942	476	127748	325	44917	253	20413	0	0	78	25578	74	25746	
22:00	713	127321	0	0	484	131222	478	128026	330	45220	261	20617	0	0	81	25617	71	25780	
23:00	672	127802	0	0	482	131502	475	128302	315	45418	243	20737	0	0	74	25659	70	25814	
24:00	196	127702	0	0	452	131764	446	128580	316	45608	241	20880	0	0	74	25700	69	25847	
Σ	783		0	0	550		544		479				0	0	81		101		872
电量	4480		0	0	6800		6780		3501			4085		0	0		1019		872

图 3.8-10 日报表功能

2.7 自动控制功能

对特定的控制对象能实现自动控制，满足对设备实现软逻辑连锁控制功能要求。

3 智能型低压成套设备的系统配置方案

智能型低压成套设备的系统配置方案主要根据系统规模大小和系统组成分布情况而定，按系统组成通常可分为三层：现场层（由智能型可通信设备组成）、通信管理层（由安装在各个配电中心或功能段的通信管理单元组成）、主站层（由监控中心计算机系统组成）。见图 3.8-11。

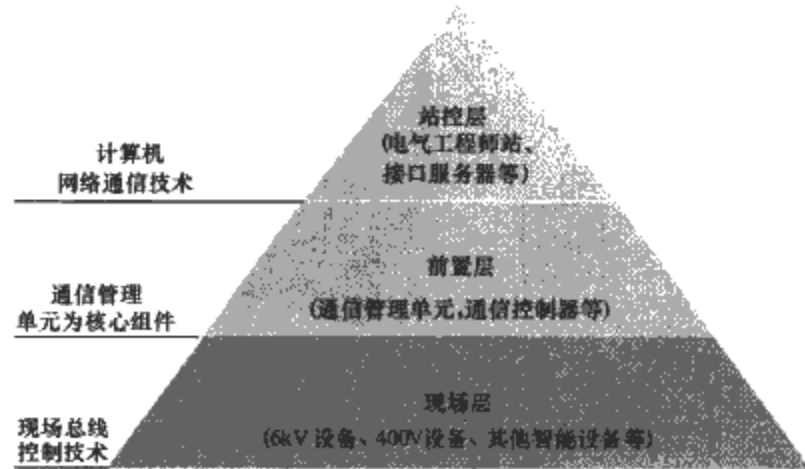


图 3.8-11 系统构成

3.1 主站层

配置了通信接口模板（如 CP5611、以太网卡、串口等），且安装了系统人机界面软件（如 Riyear-PowerNet 配电监控组态软件）的工业计算机系统，采用通信方式（如 TCP/IP）实现与通信管理层设备或现场层智能可通信设备的数据交互。根据需要可设置系统操作员站、系统工程师站、系统接口服务器、系统数据服务器等。

在主站层（见图 3.8-12）可实现整个配电系统的运行状态监控、数据管理、系统安全管理以及设备维护管理等功能。

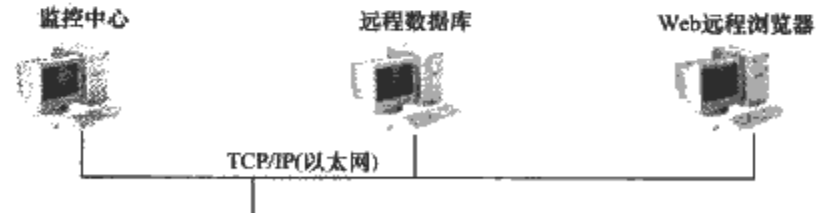


图 3.8-12 主站层

3.2 通信管理层

通信管理层主要由分布在配电柜现场或控制室内的通信管理单元或控制单元组成，他通过现场总线通信系统与现场智能设备实现数据传输。通信管理层主要功能是实现配电系统数据采集、数据筛选、数据“上下”传输以及协议转换等

功能。通信管理层现场总线通信系统采用通信协议必须是标准开放的，如 Profibus-DP、Modbus-RTU、DeviceNet 等。

通信管理层的配置根据实际需要可将通信管理单元集中组屏或安装在配电柜上，为了进一步提高系统运行的可靠性，可采用双机热备冗余模式和双端口冗余模式（需现场层设备提供两个独立的通信端口）。

3.3 现场层

现场层由分布在现场配电柜中的智能可通信保护设备、测控装置和监测装置组成，如智能型断路器、智能电力测控仪表（CE1 系列等）、智能型电动机控制器（CD4、3UF50 等）、智能 I/O 设备（CI 系列）、智能型无功补偿装置以及其他智能设备等。

4 智能型低压成套设备的结构要求

智能型低压成套设备相对于传统低压成套设备在结构上的主要区别是采用了数字式可通信智能设备、增加了现场总线通信网络，为了保证通信系统的稳定运行，必须考虑如何提高设备和通信网络的抗干扰能力和系统可维护性，主要体现在如下几个方面。

4.1 通信电缆选型

考虑到配电柜正常运行后环境温升较高、电磁场干扰较大，所以通信电缆需建议选用 A 类屏蔽双绞线，其技术指标要求见表 3.8-1。

表 3.8-1 电缆配制要求	
项 目	指 标
浪涌阻抗	135~165Ω
电容	≤30pF/m
回路电阻	≤110Ω/km
线径	>0.64mm
导线截面积	>0.34mm ²

4.2 通信电缆敷设

同样为了提高通信网络的运行可靠性和系统可维护性，要求设立专用的通信电缆敷设通道，远离强电环境。

4.3 通信电缆连接

智能设备之间和配电柜之间通信电缆的连接，必须考虑连接的可靠性，并且通信电缆的屏蔽层不能在总线任何中间位置断裂，如图 3.8-13 所示。

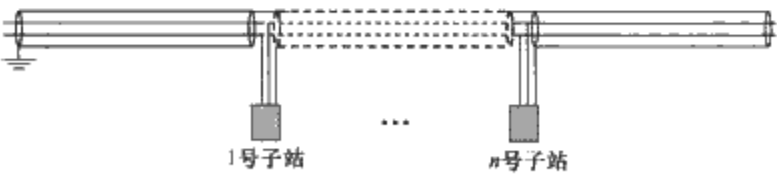


图 3.8-13 电缆的连接

4.4 系统接地

根据工程实际情况要求，通信接地方式有多种（通常采用单点接地），但通信屏蔽层接地必须可靠，以提高系统通信的稳定性。

5 智能化电器设备的选型

智能化电器设备的选型主要是指针对根据工程总体设计需要对现场层智能型保护设备、测控装置等设备进行配置。在对设备功能、质量稳定性和外形进行选择的同时必须充分考虑到现场总线通信接口规范（物理接口、协议、传输速率、数据量等）。

5.1 进线、联络及馈线（大电流）回路

采用智能型万能式断路器（如 CW1、CW2 系列等），见图 3.8-14，在考虑这些设备的相关保护特性及分断指标的同时还需考虑如何实现配电系统的远程监控功能（“四通”功能、管理维护功能等）。

(1) 智能型断路器配置通信接口功能，直接实现回路的远程监控管理功能。需明确要求断路器通信接口规范，CW1、CW2 系列断路器能够直接实现 Modbus-RTU 现场总线通信。若系统设计为 Profibus-DP 现场总线通信网络，则可以通过外加协议转换模块来实现 Profibus-DP 现场总线通信，DeviceNet 总线系统也采用相同解决办法。目前支持的协议转换模块有 CN1DP-MP（Modbus 转 Profibus-DP 适配器）、CN1DP-MD（Modbus 转 DeviceNet 适配器）、CN1EG/10（Modbus TCP 网关）。

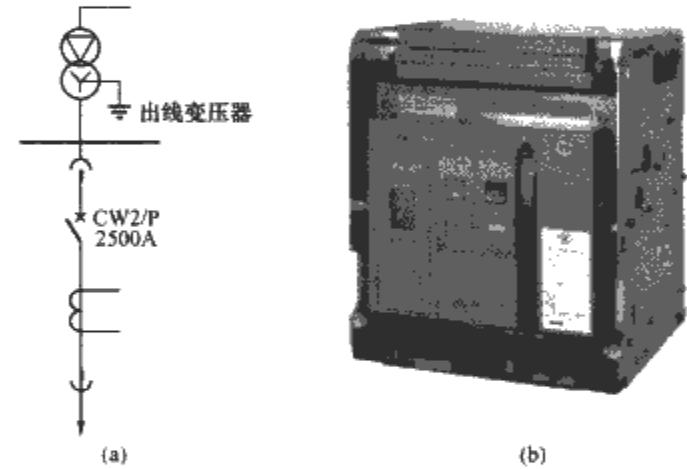


图 3.8-14 CW2/P 智能型万能式断路器
(a) 接线图；(b) 外观图片

(2) 智能型断路器未配置通信接口功能，采用外加智能型电力仪表实现回路的远程监控管理功能。主要适用于不具备通信能力的断路器回路，采用外配智能电力仪表（如 CE1Z、CE1AV 智能电力仪表等，见图 3.8-15）或远程 I/O 模块（如 CI1-SCM423），同时这些外配智能型可通信模块通信接口规范必须符合系统设计的要求。

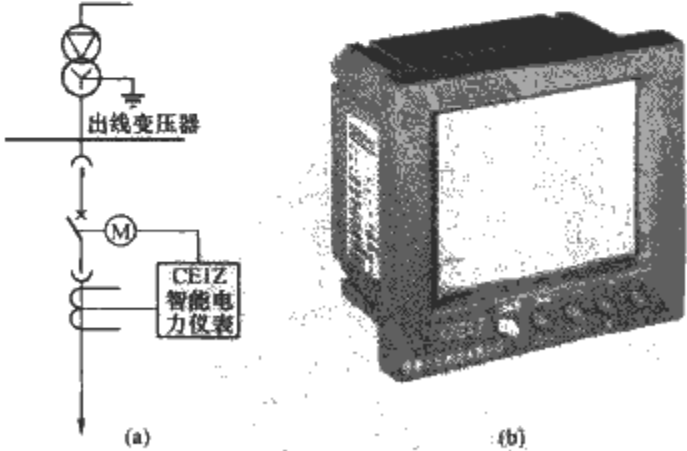


图 3.8-15 CE1Z 智能型电力仪表+普通型万能式断路器
(a) 接线图；(b) 外观图片

5.2 馈线及配电回路

采用智能型塑壳断路器（如 CM1、CM2 系列等，见图 3.8-16），同样在考虑这些设备的相关保护特性及分断指标的同时还需考虑如何实现配电系统的远程监控功能。

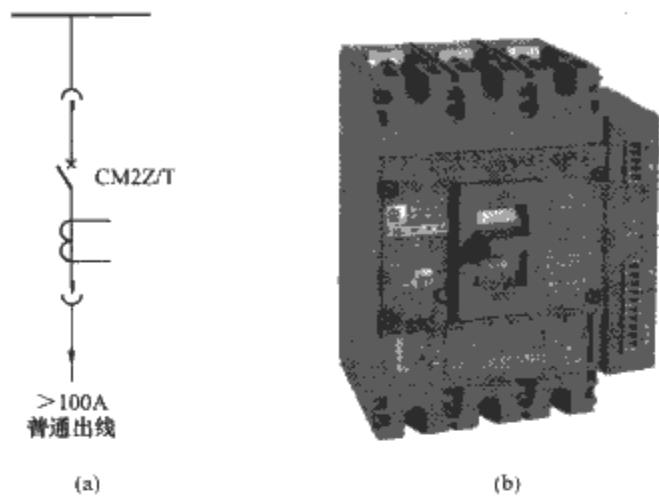


图 3.8-16 CM2Z/T 智能型塑壳断路器
(a) 接线图；(b) 外观图片

(1) 智能型塑壳断路器配置通信接口功能，直接实现回路的远程监控管理功能。主要适用于大电流等级塑壳断路器回路，且需实现比较完善的远程监控管理功能。设备配置符合系统设计要求的标准开放现场总线通信接口。

(2) 智能型断路器未配置通信接口功能，采用外加智能网络仪表或者远程 I/O 模块实现回路的远程监控管理功能。当系统中塑壳断路器不具备通信接口功能时，可通过智能电力仪表（如 CE1Z 或 CE1AV）或远程 I/O 模块（如 CI1-SCM423，见图 3.8-17 和图 3.8-18）的方案来实现回路的远程监控管理功能。

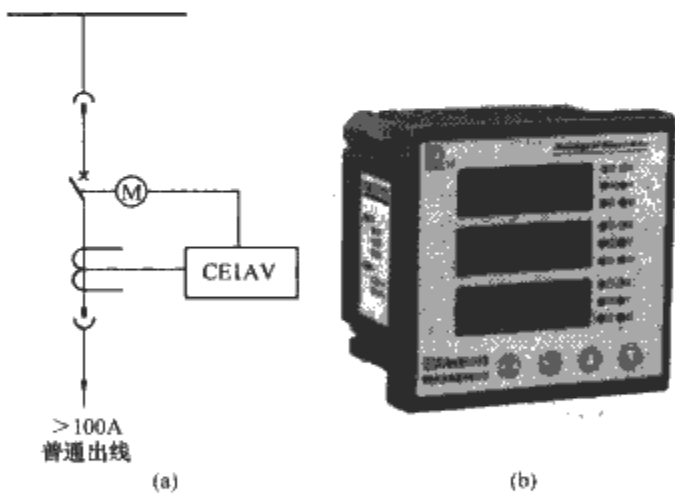


图 3.8-17 CE1AV 智能型电力仪表+普通型塑壳断路器
(a) 接线图；(b) 外观图片

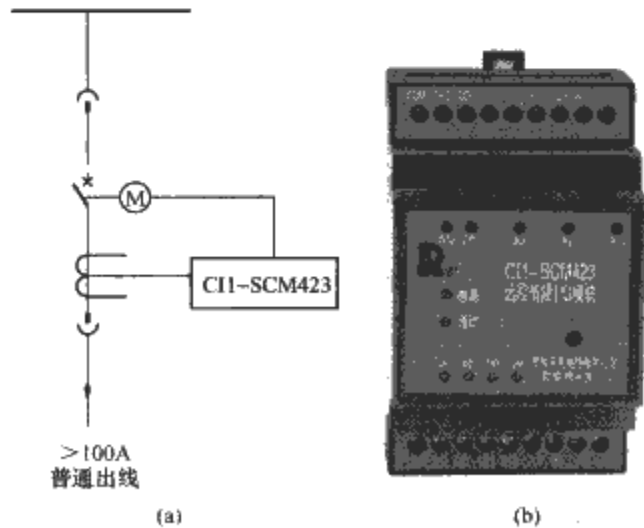


图 3.8-18 远程 I/O 模块 CI1-SCM423+普通型塑壳断路器
(a) 接线图；(b) 外观图片

5.3 电动机回路

采用智能型电动机保护控制单元/智能型控制实现电动机的各种保护功能、测量功能、操作功能和事件记录功能等。配置通信接口功能可实现电动机回路的远程运行监控管理功能。

配置电动机保护控制单元，主要适合于传统电动机回路（塑壳断路器/熔断器+接触器+保护装置）设计方案，设备通信接口规范必须符合现场总线通信系统设计要求。该方案中的保护装置采用智能型电动机保护控制单元（如 CD4、3UF50 等，见图 3.8-19）。同样设备的通信接口规范必须完全满足设计要求。

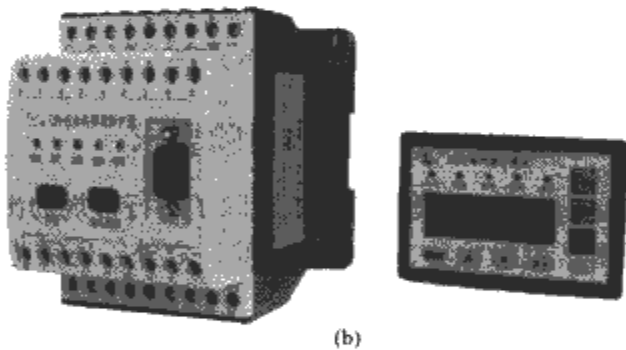
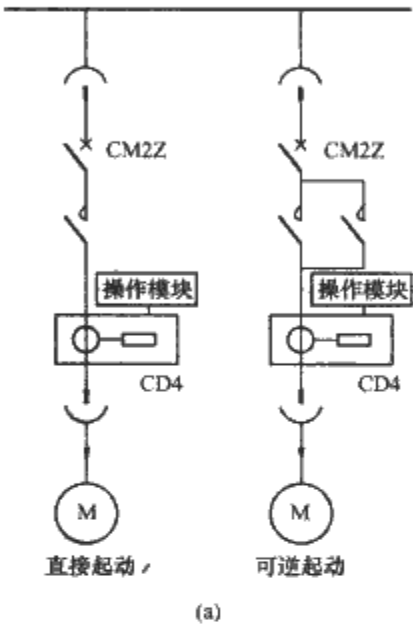


图 3.8-19 CD4 电动机控制保护器
(a) 接线图；(b) 外观图片

5.4 电容器补偿回路

电容器补偿回路采用智能型自动无功补偿装置实现电容器的自动投切、电参量（功率因数、电流等）的测量和现场总线通信，同样设备的通信接口规范必须完全满足设计要求。

因为目前国内/国际围绕着现场总线规范的标准一直有争论，各个设备厂家推崇的现场总线规范标准也不尽相同，所以有可能存在设计选用的设备通信接口规范不一致，这时针对通信接口规范不符合设计要求的设备必须配置协议转换模块，该协议转换模块通常由设备厂家配套提供，也可另行配套（如 CN1DP-MP、CN1DP-MD 系列等）。

6 智能型低压成套设备的生产工艺要求

智能型低压成套设备的生产工艺除了要满足常规的成套设备的生产工艺要求外，还必须考虑到智能化监控管理系统的生产工艺要求。

(1) 智能型保护测控装置、通信设备的屏蔽接地。由于

该类设备均为电子设备，设备内部做了大量的防辐射干扰、防传导干扰、防雷击等抗干扰措施。总结起来就是“忍”、“堵”、“疏”，屏蔽线良好的接地就为排除干扰信号提供了良好的通道。

(2) 系统通信电缆的屏蔽层接地。因为现场总线通信是采用数字信号传输，所以对于干扰信号（尖峰、脉冲群等）来说也是很脆弱的，所以通信屏蔽层的接地也就变得非常重要了。为了防止不良接地产生的电位差给设备运行带来更严重的后果，通常情况下每根总线网络的通信屏蔽层采用单点接地，并且是单独的接地网，不能和设备地连在一起接地。

(3) 智能型可通信设备与通信总线的连接。智能型可通信设备与总线的连接方式通常采用端子连接和专用连接器连接。

(4) 通信系统总线网络的结构布置。总线网络通常采用线性网络和星形网络结构，但需考虑总线分支长度。图 3.8-20 所示为线场总线网络配电柜内连接示意。

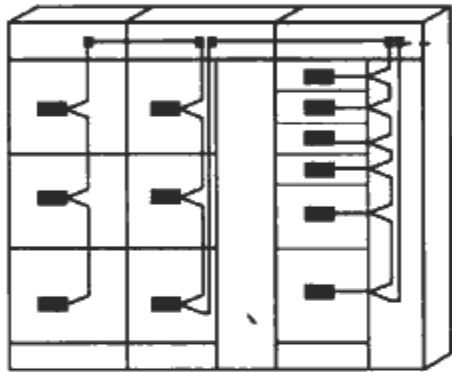


图 3.8-20 线场总线网络
配电柜内连接示意图

7 智能型低压成套设备的检验要求

智能型低压成套设备检验规范除了进行常规的出厂检验（操作检验、绝缘检验、功能验证等）之外，还需进行设备通信相关功能验证。

7.1 通信相关参数就地设置

配电柜就地通过编程模块等方式实现智能设备通信参数（通信地址、波特率等）的设置，检验设置参数的范围是否符合现场总线通信系统的设计要求。

7.2 通信功能稳定性验证

验证单台和多台智能可通信设备与主站计算机或通信管理单元之间通信的稳定性（持续通信时间不低于 8h），及时排查出故障设备，同时检验网络结构的合理性。

7.3 远程监控管理功能验证

验证主站计算机对设备的“四遥”（或部分）功能的准确性，主要检查主站软件系统组态配置的正确性。

8 智能型低压成套设备工程设计技术

智能型低压成套设备应符合 GB/T 7251.8—2005《低压成套开关设备和控制设备智能型成套设备通用技术要求》，工程设计技术除了按照配电柜常规设计需要考虑的相关要求外还需要兼顾现场总线通信系统相关要求（如现场总线类型的选择、设备通信接口规范、主站系统/通信管理设备的安装位置及安装空间、通信电缆的敷设等）。

8.1 现场总线类型

根据项目的实际需要和系统造价综合考虑系统的网络结构和总线类型。目前国内电力自动化系统中常用的总线协议如下。

8.1.1 Modbus-RTU 总线

(1) 优点。协议简单、成本低、大多数厂家均能供货、采用 A 类屏蔽双绞线实际通信距离可达到 1km（理论值 1.2km），当通信距离大于 1km 可通过增加中继器或采用光电转换模块（RS485 转光接口）实现距离的延伸。

(2) 缺点。通信速率不高，一般情况下波特率小于 100kbit/s，通常使用波特率为 19.2kbit/s。

8.1.2 Profibus-DP 总线

(1) 优点。通信速率高，通常情况下波特率可达 1.5Mbit/s，最高波特率可达 12Mbit/s；当现场通信距离超过标准要求时，可通过增加 Profibus 光电转换器或 Profibus 中继器（最多 9 个）来实现距离的延伸（见表 3.8-2）。

表 3.8-2		波特率与距离关系								
波特率 (bit/s)	9.6k	19.2k	93.75k	187.5k	500k	1.5M	3M	6M	12M	
传输距离 (m)	1200	1200	1200	1000	400	200	100	100	100	

(2) 缺点。成本相对较高，协议复杂（需提供协议转换芯片和开发工具包）。

8.1.3 CAN 总线

(1) 优点。相对于 RS485 传输距离和波特率都有很大改善（见表 3.8-3）。

表 3.8-3		波特率与距离关系						
波特率 (bit/s)	1M	500k	250k	125k	50k	20k	10k	5k
传输距离 (m)	40	130	270	530	1300	3300	6700	10 000

(2) 缺点。CAN 总线没有定义应用层协议，所以在项目实施时会因为通信协议的问题带来很大的麻烦，也不便于系统的维护；另外，由于 CAN 总线采用短帧报文传输（最长为 8B），所以对于信息量较大的电力设备来说，通信效率就会降低。

8.1.4 DeviceNET 总线

(1) 优点。在 CAN 总线基础上定义了应用层协议，统一了接口协议（见表 3.8-4）。

表 3.8-4		波特率与距离关系		
波特率 (bit/s)	500k	250k	125k	
传输距离 (m)	100	250	500	

(2) 缺点。成本高，目前国内未推广开，只有少数厂家能供货。

通过上述比较，RS485 Modbus-RTU 总线不失为一种经济型选择方案；RS485 Profibus-DP 总线通常应用在要求实时性较高的场合。另外，为了便于自动化系统的调试和维护，同一系统中的总线协议类型最好一致，尽量避免出现多种协议类型，特别是制造厂家自定义协议。

8.2 设备的接口规范

(1) 支持的波特率必须要明确（如 Modbus-RTU，不小

- 于 19.2kbit/s; Profibus-DP, 不小于 1.5Mbit/s)。
- (2) 通信典型响应时间 (如 Modbus-RTU 在 9.6kbit/s 时要求设备典型响应时间不大于 50ms)。
 - (3) 接口类型为 RS485、RS232、CAN 等。
 - (4) 总线连接方式通常有端子、DB9 插头、RJ45 插头等。

所有这些要求基本确定了系统的现场总线通信接口规范。

8.3 现场总线网络的施工

为了保证通信系统的长期稳定运行, 配电柜内通信电缆的选用和敷设必须作出明确技术要求:

- (1) 系统通信介质通常采用双绞线和光缆两种。光缆抗干扰能力较强, 但施工和维护相对较繁琐, 光缆根据需要选择单模或多模; 双绞线便于施工、维护。由于双绞线分类太多, 各种类型质量和价格差距也很大, 由于配电柜内温度高和干扰强度大, 所以建议采用 A 类屏蔽双绞线。
- (2) 通信电缆布线必须远离强电电缆, 避免与强电电缆并行。
- (3) 通信电缆尽量避免出现过量的断点, 只在总线连接设备处有断点为最佳。
- (4) 系统中通信电缆屏蔽地必须单点可靠接地。
- (5) 对于 Profibus-DP 高速总线, 总线连接需采用专用总线连接器连接。Profibus-DP 现场总线与现场可通信智能元器件之间连接主要采用 DP 标准的 DB9 总线连接器, 具体连接器示意图见图 3.8-21。

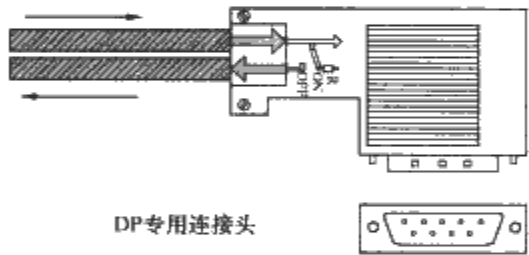


图 3.8-21 总线连接器

8.4 主站系统/通信管理设备的安装位置

主站系统/通信管理设备对现场总线通信系统的稳定运行起着非常关键的作用, 对这些设备的运行环境必须要求很好的防尘、散热和抗干扰处理。特别是通信管理单元应当集中单独组屏或独立的经防尘、散热和抗干扰处理的安装空间。

9 工程应用案例

(1) 某智能化配电监控管理系统方案简介。某工业园区智能低压配电系统共有 4 个变电站、1 个测试中心和 2 个箱式变电站组成。为了实现低压配电系统的保护、测控功能, 在配电柜中安装智能型万能式断路器, 在电容补偿柜上加无功补偿控制器及电量监控仪作为显示。

由于各变电站分布较远, 从站的节点数有 100 多点, 还需要为今后的发展和扩充留有余地, 基本情况分两个阶段。

第一阶段把 1 号、4 号变电站和生活区箱式变电站安排在一个主控站, 把 2 号、3 号变电站和顶楼箱式变电站安排在一个主控站, 生活水泵安排在一个主控站, 五台发电机控制和目前已运行的三期高压系统组成一个高压主控站。既方便操作又为以后发展留有余地, 而各个主控站则通过工厂级以太网连接到中央控制室。在中央展示室通过以太网增加一个投影屏, 实现对整个配电系统的显示。

试验站、变电站单独一个主控站, 空压机、空调机控制单独一个主控站。将在第二阶段安排实施。

多主站这种方式适合配电站相对分散, 从站设备相对较多, 数量大于 32 个系统。采用多主站形式, 多主站 PC 集中在中央控制室, 进行集中监控, 各个主站之间通过以太网与信息管理中心连接, 系统网络拓扑结构见图 3.8-22。

(2) 某热电厂智能化配电监控管理系统方案简介。机组的运行以 Riyear-powernet 系统的主机为监控中心, 实现炉、机、风机、水泵集中控制。在集中控制室内可完成机组正常运行工况的监视和调整、异常工况的报警和紧急事故处理, 在少量就地运行人员的配合下, 可实现机组的分阶段半自动起、停。

集中控制室内的控制盘上布置大屏幕, 显示少量重要参数的监视仪表和报警信号光字牌, 以及部分操作按钮, 当系统出现全局故障时, 可安全停机。

控制室具有支持大范围的 I/O 能力, 具有功能强大的组态能力, 远程 I/O 是执行控制逻辑, 数据采集的控制模块, 具有很高的可靠性和对工业过程的适用性。

中控室设备见图 3.8-23, 包括人机接口站和工程师站, 系统中的 2 台人机接口站采用高性能的 DELL 主机, Windows 操作系统作为平台。工程师站采用 1 台高性能的 DELL 计算机, 兼操作员站。

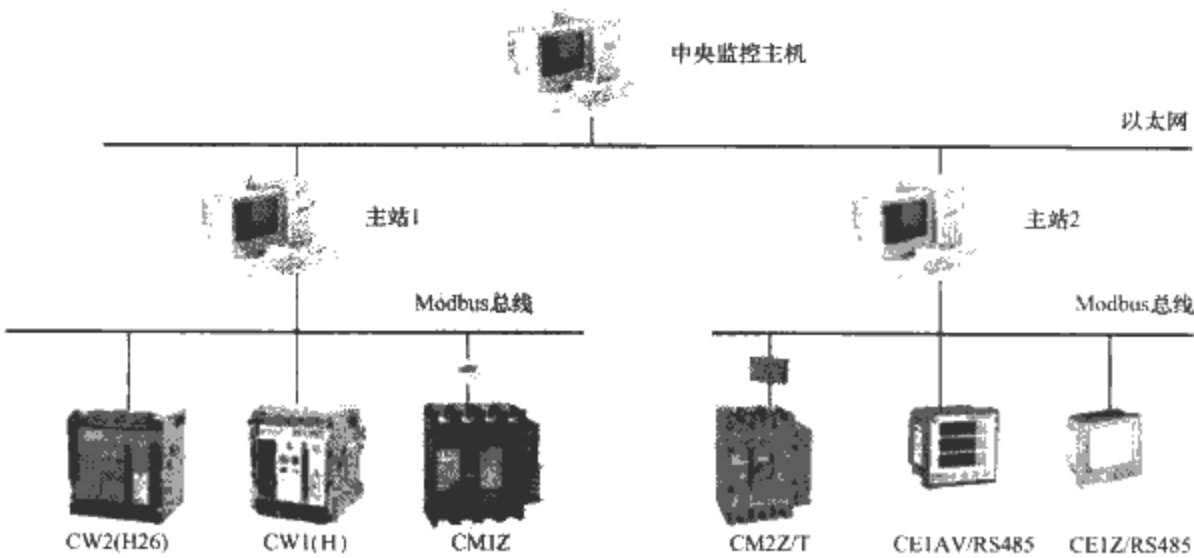


图 3.8-22 系统网络拓扑结构

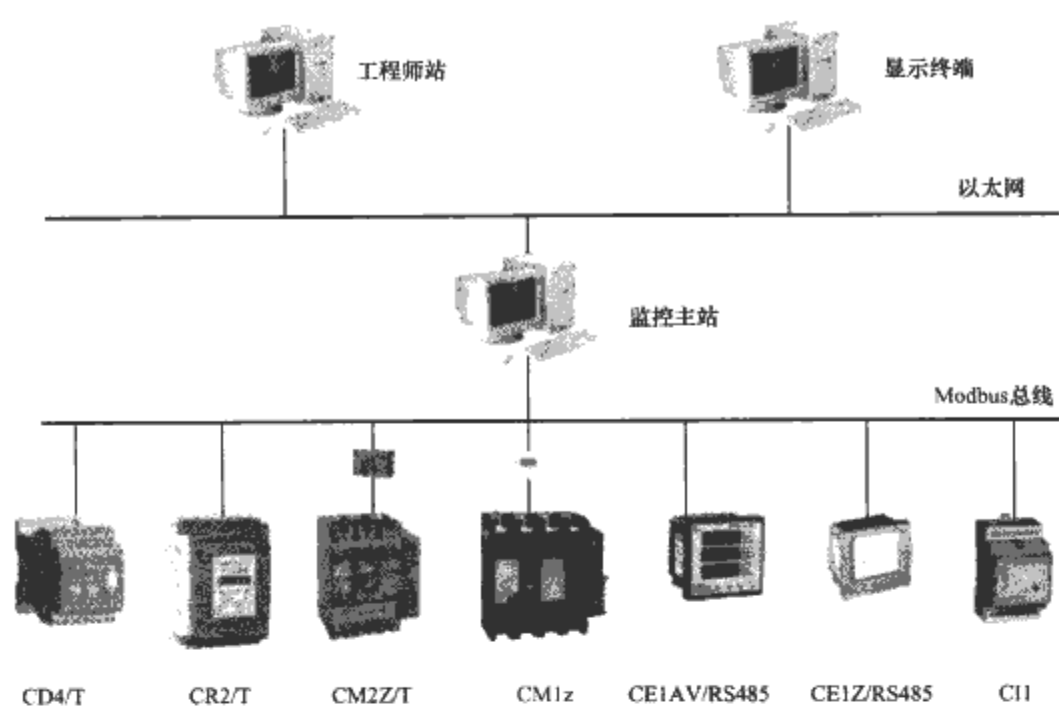


图 3.8-23 智能化配电监控管理系统网络拓扑结构示例

第9章 直流开关设备和控制设备

1 简述

1.1 直流开关设备和控制设备

直流开关设备和控制设备（以下简称直流设备），是指直流额定电压 1000V 及以下的直流设备，它由一个或多个变流装置、充电装置、储能器件、低压开关电器和相关的控制、测量、信号、保护、调节单元等，由制造厂家负责完成所有内部的电气和机械的连接，用结构部件完整地组装在一起的一种组合体。主要用于直流供电系统中作为直流电源设备、应急供电设备、备用供电设备，如变电站保护、合闸、事故检测、分闸用电源及需要提供低压直流电源的场所，包括城市轨道交通在内的交通用直流整流站成套设备和其他需要直流电源场合的直流电源装置。

直流设备的技术包括具有直流分断、自动转换、数字化、智能化控制的整流模块、高频斩波式稳压充电、稳流浮充电技术、直流系统绝缘监测、电池电压监测、标准的通信接口、系统遥控、遥信、遥测、遥调技术，蓄电池及电容器储能器件及其应用技术等。特别是双电层电容器储能产品的问世，大大推进了直流设备技术的发展。

1.2 分类

(1) 按直流设备的组成为无蓄电池组，也无电容器组的直流设备；装有蓄电池组的直流设备；装有电容器组的直流设备；蓄电池组与电容器组组合的直流设备。

(2) 按母线设置方法分为单母线系统、单母线分段系统、双母线系统。

(3) 按控制系统要求分为本机监控系统、网络监控系统。

2 主要性能及技术指标

直流设备的主要技术要求依据 GB 7251.1—2005《低压成套开关设备和控制设备 第1部分：型式试验和部分型式试验成套设备》及 JB/T 8456—2005《低压直流成套开关设备和控制设备》的规定，主要性能及技术指标如下。

2.1 额定直流输出电流、电压

额定直流输出电压 (V): 220, 110, 48。

额定直流输出电流 (A): 10, 20, 30, 50, 80, 100, 200, 315, 500, 800, 1000。

2.2 稳流、稳压精度

稳流精度 δ_I : $-1\% \leq \delta_I \leq 1\%$ (采用晶闸管), $-0.5\% \leq \delta_I \leq 0.5\%$ (采用高频开关)。

稳压精度 δ_U : $-1\% \leq \delta_U \leq 1\%$ (采用晶闸管), $-0.5\% \leq \delta_U \leq 0.5\%$ (采用高频开关)。

充电装置的稳压精度为

$$\delta_U = |U_1 (\text{或者 } U_2) - U_e| \times 100\% / U_e \quad (3.9-1)$$

式中: U_e 为蓄电池组浮充电压规定值; U_1 为交流输入电压

110%时浮充装置输出电压; U_2 为交流输入电压 90%时浮充装置输出电压。

连续进行三次, 取每次较大的平均值, 按式 (3.9-1), 计算出稳压精度。

充电装置稳流精度为

$$\delta_I = |I_1 (\text{或者 } I_2) - I_N| \times 100\% / I_N \quad (3.9-2)$$

式中: I_N 为交流输入电压为额定值, 使充电装置输出电压调至为蓄电池组浮充电压与充电终止电压的平均值时, 充电装置输出电流额定值; I_1 为交流输入电压 110%, 充电装置输出电压调至为蓄电池组浮充电压值时充电装置输出电流值; I_2 为交流输入电压 90%, 充电装置输出电压调至为蓄电池组浮充电压值时充电装置输出电流值。

2.3 纹波因数

$\gamma_U \leq 1\%$ (采用晶闸管); $\gamma_U \leq 0.5\%$ (采用高频开关)。

2.4 效率

$\eta \geq 75\%$ (采用晶闸管); $\eta \geq 90\%$ (采用高频开关)。

2.5 功率因数

$\cos\varphi \geq 0.7$ (晶闸管); $\cos\varphi \geq 0.95$ (采用有源功率因数校正电路的高频开关); $\cos\varphi \geq 0.90$ (采用无源功率因数校正电路的高频开关)。

2.6 均流不平衡度

$-5\% \leq \beta \leq 5\%$ (高频开关整流器并机工作时)。

2.7 噪声

风冷直流设备的噪声平均噪声 (A 声级) 不大于 60dB, 自冷直流设备的噪声平均噪声 (A 声级) 不大于 55dB。

2.8 保护及报警

直流设备应有可靠的故障报警功能, 并在直流设备的输出端子排上配有对应于故障信号输出的一对端子。在操作盘面上应能观察到相应的报警指示。

2.9 绝缘检测

(1) 直流设备的绝缘检测水平见表 3.9-1 的规定。

表 3.9-1 绝缘水平整定值

直流设备额定标称电压 (V)	绝缘检测水平整定值 (MΩ)
220	25
110	7
48	1.7

(2) 当直流设备输出母线发生接地故障 (正接地、负接地或正、负同时接地或绝缘电阻达不到规定要求时), 绝缘监测装置具备如下功能:

1) 指示出接地故障线路号。

2) 发出声光报警,且故障信号应可靠地从故障信号输出端子上反映出来。

(3) 电压监察。当直流设备交流输入及输出电压出现过电压或欠电压时,直流设备发出过电压或欠电压的信号及声光报警,且故障信号从故障信号输出端子输出。

(4) 故障报警。当直流设备出现如下故障时,直流设备发出声光报警,且故障信号从故障信号输出端子输出:

1) 直流断路器自动跳闸或熔断器熔断。

2) 当直流设备的充电装置充电电流大于规定的充电电流的105%,且在3s内不能恢复为规定的充电电流。

3) 交流输入电源缺相、欠电压和过电压。

4) 输出短路。

5) 对于配有可编程序控制器(PLC)或微机监控的直流设备,PLC或微机死机、失调。

6) 降压装置失效(当降压装置运行时对电压无影响)等。

(5) 限流特性。蓄电池组充电电流为恒流充电规定电流值的105%~110%时,直流设备应在2s内将充电电流限制为恒流充电规定电流值,同时不应出现故障报警信号。

(6) 事故放电能力。切断交流电源,常规负荷母线以额定电流输出1h后,叠加动力负荷母线电流,进行10次冲击放电。动力负荷母线电压在冲击放电时应不低于标称电压的90%。

(7) 连续供电能力。直流设备在正常运行时,突然中断交流电源,常规负荷母线电压不间断,且电压波动不低于标称电压的90%。

(8) 通信功能。直流设备具有以数字技术为核心的远程控制及遥测、遥控和遥信的“三遥”功能,且接口形式和通信协议标准化。

(9) 过载能力。在额定功率的110%情况下直流设备至少可正常运行10min。

(10) 接地保护。金属安装支架、元件安装架对地的保护导体连续性电阻不大于 0.1Ω 。

3 功能单元的主要性能

直流成套设备已发展到功能单元模块化,各个功能单元有相对的完整性、独立性,有利于规模化生产及维修。

通常直流成套设备是由充电、整流单元、降压单元、绝缘检测单元、蓄电池组监测单元、放电单元、蓄电池组、电容器组、监控单元、交流进线单元、直流电源输出单元等功能单元构成。

3.1 充电、整流单元

(1) 整流、充电单元。按长期额定工作制设计(电容器充电装置的隔离变压器除外),其性能指标及安全要求满足直流设备的有关规定;设有运行参数、设定操作键、工作状态、故障状态的指示灯及其仪表;输入与输出之间要有可靠的电气隔离措施;充电装置的电磁兼容性满足相关的规定。直流系统内的充电及整流设备通常采用冗余配置。

(2) 采用高频开关的充电及稳压整流单元。变电站用直流成套设备多数采用高频开关电源做充电及稳压整流单元,采用高频开关的充电及稳压整流单元还应满足下述要求:

1) 设有滤波或功率因数校正电路,并有软起动功能。

2) 在开路状态下不应出现自激振荡现象。

3) 单元的安装应为热插拔方式,与框架之间有可靠的电气连接、结构配合及良好的接地有效性。

(3) 蓄电池充电单元。采用蓄电池充电单元的要求:

1) 前面板应设开/关机、均/浮充转换、充电电流调节、充电电压调节等操作按键,并应设有过载、短路、限电流、过电压、欠电压、超温等保护电路及相应的报警信号指示,但对于正常的负荷变化,保护电路不应有动作。

2) 能对其输出按整定值进行自动调节或手动调节。调节是按照充、放电曲线的要求完成由低容量至额定容量的充电过程,及由均衡充电至浮充电状态的全过程。整定值是按蓄电池组的要求调节均衡充电电流、浮充电电流及稳压值。当单元由监控系统控制时,充电单元内的自动调节功能应作为后备。

(4) 稳压及充电单元(整流器)基本性能应能满足对直流设备基本性能的要求。

3.2 降压单元

为了保证蓄电池组在接近放电终止电压时依然能保证直流馈出母线有足够的输出能力,需要有足够的蓄电池单体,这样就使得蓄电池组的浮充电压过高而不能满足直流馈出母线电压的要求。为此,在蓄电池组与直流馈出母线之间放置降压单元以保证直流输出电压的要求。

(1) 在直流设备中电池组的降压单元应按长期额定工作制设计,其性能指标、安全要求、可靠性及电磁兼容性应能满足直流设备的有关规定。

(2) 降压单元的额定电流应满足所在回路最大持续电流及额定冲击电流。通常采用硅整流管(PN结)降压方式及合理的降压电路方案以确保降压单元的可靠性和安全性。不宜采用有源电路及电子开关电路,如采用,必须保证在有源电路及电子开关电路出现故障时蓄电池组与直流馈出母线有可靠的连接。

(3) 降压单元具有手动及自动调节输出电压,在蓄电池组电压足够高时,降压单元的输出电压调节范围应满足直流母线输出电压的要求。

(4) 蓄电池组电压过低时应能保证蓄电池组直接向直流母线供电。采取可靠有效的措施防止调压单元出现内部故障时导致直流母线断电,确保供电的连续性。

3.3 操作直流电源

这一部分包括逆变电源DC/AC、低压电源DC/DC等辅助电源(供监控、通信、传感仪表等)均应满足相应的标准规定。

3.4 监控单元

3.4.1 监控单元的功能

监控单元管理直流系统的工作状态;具有对整流及充电单元进行监控;对交流三相电源、直流母线、蓄电池组、母线绝缘电阻、充电(浮充)电流值及电压值等进行监测及声光报警的功能;自诊断功能并可完成系统所要求的操作、测量、显示及通信等功能。其性能指标、安全要求、可靠性及电磁兼容性应能满足JB/T 8456—2005的规定。

带有蓄电池组后备电源的系统,当三相交流电源接通和关断之后,不影响监控单元的正常运行,所有的信号应不出现任何误动作。当蓄电池组电压下降到终止电压时监控单元要自动关闭,重新自动启动时要有延迟时间。

3.4.2 监控单元的组成

监控单元是以可编程序控制器(PLC)、微处理器或工控机为控制核心,并由操作键与显示单元构成方便的人机对话系统,通过操作键与显示单元可以设定和修改运行参数、

监视运行状态。通过通信接口实现对其他装置的数据采集，并可实现对运行状态及事故状态的记录查看。

3.5 绝缘检测单元

由于直流系统为不接地系统，直流母线的接地现象会引发系统故障。因此，绝缘检测是必须的。大型直流系统应采用绝缘检测单元，绝缘检测应该是实时的。

绝缘检测单元是检测各个馈出支路直流母线的绝缘水平。

绝缘检测单元其性能指标、安全要求、可靠性及电磁兼容性应能满足本标准的有关规定。绝缘检测单元应能完成对直流主母线、各分支母线（馈出支路）的任一极与零电位（接地零）间绝缘电阻值的测量。绝缘检测精度按系统要求。

3.6 蓄电池组监测单元

蓄电池组的检测以测量的方法监测蓄电池组的充、放电状态，这可以作为测量周期的一部分自动的进行或作为一种个别功能进行。该蓄电池组至少在一个测量周期内应施加较重的负载。蓄电池组监测单元能检测蓄电池组的端电压及每只蓄电池（由单体蓄电池组成的标准蓄电池单元）的电压，其测量精度应不低于系统对稳压精度的要求，例如 $\delta_U \leq 0.2\%$ 。蓄电池组监测单元能对蓄电池的短路及开路进行有效的判别，对蓄电池的内阻或容量有定性的分析，蓄电池组的监测功能是实时的，通常由监控单元来实现。

3.7 放电单元

用于蓄电池组容量的定期放电，以检验蓄电池组的容量。放电单元的放电电流应是恒定的。对于非恒流放电单元可采用计算方法（软件）进行蓄电池组容量的核对。通常放电单元采用移动式设备。

3.8 蓄电池组

蓄电池的选择及安装应根据直流设备运行的条件及用户的要求而定。电力系统运行的直流设备和其他特殊使用条件下的直流设备所使用的蓄电池组可根据 DL/T 724—2000《电力系统用蓄电池直流电源装置运行与维护技术规程》及 DL/T 5120—2000《小型电力工程直流系统设计规程》要求选择。

所选择蓄电池组的性能、指标应能满足其相应标准的规定。防酸蓄电池、阀控式密封铅酸蓄电池应满足 GB 13337.1—1991《固定型铅酸蓄电池技术条件》及 DL/T 637—1997《阀控式密封铅酸蓄电池订货技术条件》的要求。

对直流设备加以说明适合采用何种蓄电池可满足直流设备性能的要求，并对蓄电池的形式、种类、电压、数量、容量、充放电曲线（特性）、放电倍率等加以描述。

对蓄电池的防爆性能、阻燃性能、安全使用及维护条件、储藏及运输有详细的说明，以保证使用和维护时对人及设备的安全。

容量较小的蓄电池组（镉镍蓄电池高倍率 40A·h 以下或中倍率 100A·h 以下、阀控蓄电池 200A·h 以下）可安装在直流设备柜内，大容量蓄电池组应有专用的电池室，并能保证电池室的环境要求及检修、维护条件。

一般蓄电池的使用环境温度应经常保持在 5~35℃ 范围内。阀控密封式蓄电池使用环境温度在（-10~45）℃ 条件下应能正常使用。蓄电池应可靠固定安装，在抗震烈度为 7 度及以上地区也能正常使用。

3.8.1 蓄电池的绝缘电阻

标称电压为 220V 的蓄电池组不低于 200kΩ，标称电压为 110V 的蓄电池组不低于 100kΩ，标称电压为 48V 的蓄电池组不低于 50kΩ。

3.8.2 蓄电池组容量

蓄电池组选择的容量应满足交流电网停电时间内全过程的放电容量，同时应满足负荷的分配要求及负荷的特性要求。

蓄电池组的容量选择应依据不同种类蓄电池具有不同充电率和放电率的特性。

发电厂、变电所对蓄电池组的容量计算方法见 DL/T 5044—2004《电力工程直流系统设计技术规程》。

蓄电池组的容量是通过充放电（按蓄电池的额定容量及充电率和放电率）试验获得。蓄电池放电终止电压及充放电电流按表 3.9-2 的规定。

表 3.9-2 蓄电池放电终止电压及充放电电流

蓄电池类别	标称电压 (V)	放电终止电压 (V)	额定容量 (A·h)	充放电电流 (A)
固定防酸式铅酸型	2	1.8	C_{10}	I_{10}
阀控密封型	2	1.8	C_{10}	I_{10}
	6	5.25 (1.75×3)	C_{10}	I_{10}
	12	10.5 (1.75×6)	C_{10}	I_{10}
镉镍碱性	1.2	1.0	C_5	I_5

通常允许进行三次充放电循环试验，第三次循环应达到额定容量。若达不到额定容量值的 100%，则此组蓄电池为不合格。当某一蓄电池达不到额定容量的 80%，则认为此蓄电池已失效，应及时更换。直流设备每运行 3~6 个月，充电装置应对蓄电池组进行一次全过程充电。直流设备每运行 1~2 年，必须对电池组进行一次核对性放电。当直流设备具有两组及以上蓄电池组时可分别进行全核对性放电；当直流设备仅有一组蓄电池组时不得进行核对性放电。可采用其他措施恢复电池的有效性，但不得使电池容量低于额定容量的 50%，除非直流设备停止运行。可通过监测装置对蓄电池的电压、内阻及容量进行巡回检测，以判定蓄电池的有效性。

3.8.3 蓄电池的运行与防护

3.8.3.1 防酸蓄电池组

(1) 在正常运行中要监视端电压值、单体电池电压值、蓄电池液面高度、电解液密度、蓄电池内部温度、环境温度、浮充电流值。

(2) 当蓄电池极板产生硫酸铅结晶体时，要对蓄电池进行活化处理，使蓄电池容量得到恢复。

(3) 蓄电池组在运行时要防止电解液的温度超过 35℃。

(4) 要及时清除蓄电池底部沉淀物，补充配置的标准电解液。

(5) 当蓄电池极板发生弯曲、龟裂或肿胀，应及时更换蓄电池。

3.8.3.2 镉镍蓄电池组

(1) 镉镍蓄电池侧面标有电解液高度的上下刻线，在浮充电运行中液面高度应保持在中线。液面偏低时应注入蒸馏水，使液面高度保持一致。

(2) 每三年更换一次电解液。

(3) 应使用壳体不产生“爬碱”的蓄电池。

3.8.3.3 阀控蓄电池组

(1) 阀控蓄电池的容量受环境温度影响，其温度补偿系数：基准温度 25℃时，每下降 1℃，单体 2V 电池浮充电压值应提高 3~5mV。

(2) 在运行中要监视端电压值、单体电池电压值、腐蚀现象、壳体有无渗漏和变形、极柱与安全阀周围是否有酸雾溢出、蓄电池温度是否过高等。

(3) 在运行中，当某一蓄电池浮充电压正常，一旦放电，电压便跌落到终止电压值，说明此蓄电池已经失效，要及时更换。

(4) 当充电电流过大、充电电压过高、内部有短路或局部放电、温升超标、阀控失灵都可能造成蓄电池壳体异常，要检查原因采取措施。

4 直流系统设计及电器元件的选择

直流系统的设计应满足主要性能、技术指标及用户的要求，元器件的选择应符合 GB 7251.1 第 7.6 条要求；母线、绝缘导线等按 GB 7251.1 第 7.8 条规定。

4.1 直流系统的设计

对直流开关设备的设计要求，就是对直流系统的要求。直流系统设计中除了对蓄电池/电容器和直流配电的选型外，还涉及充电装置的配置、系统控制、系统保护等方面的要求。

4.2 蓄电池的选择

4.2.1 蓄电池容量的选择

蓄电池容量的计算公式为

表 3.9-3 一组阀控式铅酸蓄电池的容量换算系数示例

蓄电池型号及容量 (A·h)	单体电池终止电压 (V/只)	不同电池放电持续时间的容量换算系数												
		5s	1min	30min	60min	90min	120min	150min	180min	240min	300min	360min	420min	480min
GMF (200~300)	1.75	1.520	1.500	0.980	0.600	0.480	0.380	0.337	0.283	0.230	0.193	0.167	0.146	0.130
	1.80	1.420	1.400	0.900	0.580	0.460	0.365	0.324	0.278	0.221	0.189	0.163	0.142	0.125
	1.83	1.350	1.300	0.800	0.555	0.440	0.346	0.316	0.267	0.215	0.182	0.158	0.138	0.124
	1.85	1.300	1.230	0.770	0.545	0.420	0.342	0.306	0.261	0.212	0.181	0.156	0.138	0.122
	1.87	1.250	1.150	0.740	0.530	0.404	0.334	0.298	0.255	0.208	0.176	0.154	0.135	0.120
	1.90	1.180	1.020	0.660	0.490	0.386	0.318	0.289	0.243	0.200	0.169	0.147	0.129	0.115

在计算容量换算系数时，必须要以放电终止电压和放电持续时间为条件。可靠系数 K_K ，可靠系数主要考虑低温对蓄电池的影响、电池的参数不一致的影响、放电终止时应有一定剩余容量以及当电池容量低至 80% 时为寿命终止等因素，视负荷均匀和重要程度一般取 1.5~2.0。

确定了以上几个参数，则可以计算出电池的容量，下面举例说明。

已知某变电所负荷情况为：经常负荷 5A，1h；事故照明 4.5A，1h；远动电源 4A，1h；UPS 输入 3A，0.5h；负荷持续时间为 1h，蓄电池个数为 108 个，终止电压取 1.83V/个。

故放电容量

$C_S = [(5 + 4.5 + 4) \times 1 + 3 \times 0.5] A \cdot h = 15 A \cdot h$

平均事故放电电流

$I_S = (15 \div 1) A = 15 A$

查得容量换算系数 $K_C = 0.505$ ，可靠系数 K_K 取 1.5，则

$C_C = K_K I_S / K_C \tag{3.9-3}$

式中： C_C 为蓄电池容量； K_K 为可靠系数（取 1.5~2.0，当事故放电电流基本不变时取较小值）； I_S 为平均事故放电电流； K_C 为容量换算系数。

如某变电所事故放电时间为 1.5h，开始 30min 放电电流为 20A，接下来的 30min 的放电电流为 10A，最后 30min 的放电电流为 6A，那么可按下式计算平均事故放电电流

$I_S = \frac{\sum (\text{各阶段放电电流} \times \text{放电时间})}{\text{事故总放电时间}}$

$I_S = [(20 \times 0.5 + 10 \times 0.5 + 6 \times 0.5) \div 1.5] A = 12 A$

容量换算系数是指电池在特定条件（一定的放电终止电压和放电时间）下的放电电流和额定容量的比值。如某品牌 200A·h 电池，其放电终止电压为 1.83V，放电持续时间为 1h，查其放电参数表得到放电电流为 101A，那么这种电池在这一条件下的容量换算系数为

$K_C = 101 / 200 = 0.505$

如放电终止电压为 1.83V，放电持续时间为 2h，查其放电参数表得到放电电流为 68A，那么这种电池在这一条件下的容量换算系数为

$K_C = 68 / 200 = 0.34$

各种电池的容量换算系数各不相同，应根据电池放电参数进行计算。但阀控式铅酸电池的容量换算系数在一定范围内可以参考，当不确定时可靠系数 K_K 取高值可保证使用安全。表 3.9-3 为一组阀控式铅酸蓄电池的容量换算系数示例。

电池容量

$C_C = K_K I_S / K_C$
 $= (1.5 \times 15 \div 0.505) A \cdot h$
 $= 44.6 A \cdot h$

查蓄电池型号规格，可选用 $C_{10} = 50 A \cdot h$ 的蓄电池。

存在冲击负荷和短时负荷及各时段负荷严重不均匀时，应查冲击放电曲线进行电压校验，当不能满足要求时，应加大电池容量继续校验，直到满足要求为止。

根据经验，对于变电所采用的直流系统，断路器合闸采用弹簧操作系统时，由于冲击负荷很小，一般无需电压校验；如采用电磁操作机构，冲击负荷很大，应进行电压校验。发电工程由于事故油泵起动，事故初始电流很大，一般需要进行电压校验，设计中应根据具体负荷情况确定。

4.2.2 蓄电池的组数量的选择

主要考虑事故放电终了，维持直流母线的电压不低于 $0.85U_N$ （合闸直流母线的电压不低于 $0.9U_N$ ）。充电末期直流母线的电压不高于 $1.1U_N$ 。当冲击负荷出现的时间相差

0.25s 以上时,可按不同时出现考虑。一般可以考虑一台断路器的合闸电流。

4.3 充电装置中整流器的选择

常用的整流器主要有工频整流器和高频开关电源整流器两种。

4.3.1 工频整流器

在电力工程直流电源中,工频整流器由于其安全可靠、结构简单、维护方便等特点,尚广泛应用。其主要存在的问题是效率低、功率因数低、体积大、噪声大,但仍能满足电力系统的要求,所以现在工频整流器仍是可供选择的一种充电装置。

工频整流器整流元件主要采用晶闸管整流器,整流电路主要采用三相全控桥。工频整流技术已经十分成熟,下面以 PGD2-IV 型直流电源所配的晶闸管整流器为例,对现在直流电源中应用非常广泛的三相晶闸管全控桥整流单元做一些简单介绍。其工作原理框图如图 3.9-1 所示。

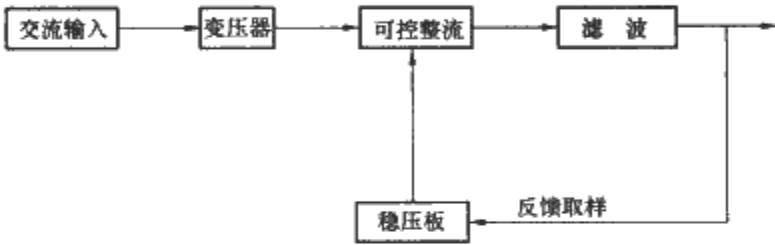


图 3.9-1 三相整流器工作原理框图

$$U_d = k_1 U_{v2} [b \cos \alpha - (k_x e / 100) \times I_{dmax} / I_{dN}] - n U_{d_f}$$

式中： U_d 为整流器输出直流电压，V； k_1 为整流电压计算系数（见表 3.9-4，三相全桥取 2.34）； U_{v2} 为变压器 2 次电压额定值，无变压器、即电网直接供电电压，V； b 为电网电压负波动系数，一般取 0.90~0.95； α 为（ α_{min} ）最小触发延迟角，对本线路可取 5°~10°； k_x 为换相电抗压降系数； e 为变压器阻抗电压的百分数； I_{dmax} / I_{dN} 为直流电流的过载倍数； U_{d_f} 为晶闸管管压降； n 为电流通过晶闸管数——串联数。

表 3.9-4 三相全桥整流整流电压计算系数

线路	换相电抗压降系数	整流电压计算系数	晶闸管电压计算系数	晶闸管电流计算系数	变压器阀侧电流计算系数	变压器网侧电流计算系数	导通角	输出波数
三相全桥	0.5	2.34	2.45	0.367	0.816	0.816	120°	6

4.3.2 高频开关电源整流器

高频开关电源由于其体积小、重量轻、效率高、功率因数高、扩容方便、适应性强以及其低噪声、低辐射、低污染等特点,在变电站直流电源中,得到广泛的应用。

高频开关电源工作原理框图如图 3.9-2 所示。

高频开关电源的基本组成如图 3.9-2 所示,它主要包括主电路、控制电路、监控电路、辅助电源等部分组成。

主电路由交流滤波、整流、DC/DC 变换、直流滤波和输出保护等组成,具有作用如下:

(1) 输入滤波。电路包括低通滤波、浪涌电压抑制等,该电路滤除电网内的杂波,并阻碍本机产生的杂波反馈到输入电网。

(2) 整流滤波。将滤波后的交流电源直接整流成平滑的直流电。

(3) DC/DC 变换。这部分电路由功率变换和高频整流两部分组成。将整流后形成的直流电变换为符合直流系统的

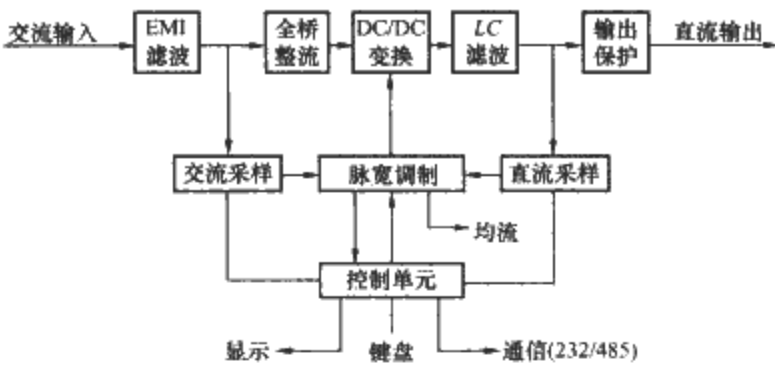


图 3.9-2 高频开关电源工作原理框图

直流电源,它是高频开关电源的核心部分。

(4) 滤波输出。将 DC/DC 变换后的直流电压,经二次滤波后获得满足系统要求的直流电压,输出到直流系统中。

(5) 控制电路。通过检测、设定电路进行比较、放大控制直流变换器,进而调节脉冲宽度或频率,达到输出电压稳定的作用;同时根据检测数据,经保护电路鉴别、提供控制电路对主回路实施保护。

(6) 检测电路。从输出电路采样,得到反映电源运行情况的信息数据,进而反馈给控制电路和保护电路,由它们实施对主电路的控制或保护作用。

开关电源中还有辅助电源、时钟电路等辅助电路,此外,为了提高和改善功率因数,在高频开关电源的主回路中,在预整流部件之后、DC/DC 变换电路之前增加了功率因数校正回路。设置功率因数校正回路后,高频开关电源的功率因数可提高到 95% 以上。

有关高频开关电源的技术指标、产品性能,请参考高频开关电源厂家所提供的产品技术说明书。

4.4 直流开关和保护电器的选择

直流系统中开关电器有两种,一种是隔离开关,具有开关和隔离作用;另一种是断路器,它具有开关和保护作用。

直流保护电器也有两种,一种是熔断器,仅具有保护作用;另一种断路器,兼有保护、开关作用。

当采用熔断器作为保护电器时,必须辅以隔离开关作为隔离操作电器。

4.4.1 直流系统短路电流计算

4.4.1.1 直流蓄电池组

当蓄电池组的出口处发生短路,通过的短路电流如图 3.9-3 所示。

$$I_{sc} = \frac{U_b}{R_i}$$

式中： I_{sc} 为直流系统短路电流； U_b 为电池组充电时的开路端口电压； R_i 为蓄电池组的内阻和,如生产方未提供 R_i 时,可用近似公式 $I_{sc} = KC$ 计算出（ C 为电池组的额定容量； K 为近似于 10 倍的计算系数,但通常不会大于 20）。



图 3.9-3 直流蓄电池组短路图

4.4.1.2 直流发电机

如图 3.9-4 所示, $I_{sc} = \frac{U_g}{R_i}$, U_g 为发电机的开路端口电压, R_i 为发电机的内阻。当未有精确的开路电压时,可认为 $U_g = 1.1 U_N$ (U_N 为直流系统额定电压)。例如,220kW、230V 的直流发电机,内阻为 0.032Ω,则产生的短路电流 $I_{sc} = (1.1 \times 230 / 0.032) A = 7.9 kA$ 。

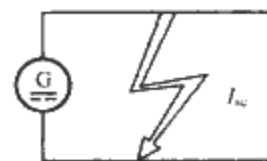


图 3.9-4 直流发电机短路图

4.4.1.3 直流系统中某一点的短路电流

如图 3.9-5 所示,在这种情况下,短路电流 $I_{sc} = U / (R_i + R_l)$, R_i 为发电机的内阻, R_l 为故障回路导体总电阻,还要考虑有电机负载的直流系统中故障时电机的反馈电流,一般为 6 倍电机额定电流 $6I_N$, 此后故障电流总和为 $I_{sc} = U / (R_i + R_l) + 6I_N$ 。

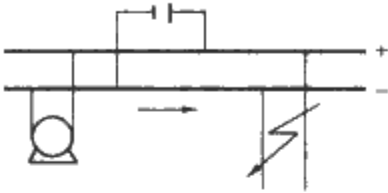


图 3.9-5 直流系统中
某一点的短路

4.4.2 直流保护电器额定电流的选择

4.4.2.1 直流开关和保护电器额定电流的选择原则

直流开关和保护电器按照工作电压和工作电流选择。工作电流取通过开关电器的最大电流,并留有一定的裕度。电流可采用下式选择

$$I_r = KI_{Lm}$$

式中: I_r 为电器设备的额定电流; K 为可靠系数 (K_K) 或配合系数 (K_C), 不同设备, K 取值不同 (见表 3.9-5); I_{Lm} 为通过电器负荷电流的最大值 (见表 3.9-5)。

表 3.9-5 直流设备额定电流的选择

设备名称	最大负荷电流	可靠或配合系数	备 注
隔离开关	最大负荷电流 I_{LM}	$K_K = 1.2 \sim 1.5$	
直流电动机 保护电器	电动机起动电流 $I_{st} = (2 \sim 2.25) I_N$	$K_C = 0.5 \sim 0.4$	I_{st} 为起动电流
合闸回路 熔断器	断路器合闸电流 I_{CL}	$K_C = 0.2 \sim 0.3$	I_{CL} 为合闸电流
其他直流 保护电器	短时最大负荷 电流 I_{LM}	$K_C = 0.6 \sim 0.7$	

4.4.2.2 熔断器的选择性配合

选择性, 即当在电网某处出现短路故障时, 仅与该故障点临近的保护电器动作, 来切断该故障回路, 而距离该故障点较远的上一级保护电器应不动作。按照表 3.9-6 选择保护电器的额定电流后, 还必须考虑上、下级电器间的选择性配合计算。

表 3.9-6 NT 型熔断器额定电流等级配合表 A

上级熔断器	16	20	25	32	36	40	50	63	80	100	125	160
下级熔断器	6	10	10	20	20	25	25	36	50	63	80	100
上级熔断器	200	224	250	300	315	355	400	425	500	630	800	1000
下级熔断器	125	125	160	160	200	200	250	250	315	400	500	630

熔断器的选择性配合是考虑熔断器的熔断电流和熔断时间的配合, 熔断器上、下级之间的配合比应不小于 2。

4.4.2.3 断路器的选择性配合

- 断路器的选择性计算应按以下步骤进行:
- (1) 按负荷要求和热脱扣特性配合要求选择上、下断路器额定电流。
 - (2) 计算网络短路电流。
 - (3) 根据断路器额定电流和通过该断路器的最大短路电流, 选择电磁脱扣倍数。
- 为保证选择性, 上、下级断路器应满足下述要求:

(1) 上、下级断路器额定电流应具有 2~3 级之差, 以满足延时脱扣器的选择性要求。

(2) 上、下级断路器额定电流及短路电流整定倍数, 除应满足动作可靠性的要求外, 还必须满足瞬时脱扣器的选择性要求, 即

为满足下级断路器的可靠动作, 可靠系数 $K_d = I_{sc} / (n_{zd} \times I_{Nd}) \geq 1.1 \sim 1.2$

为满足上级断路器的可靠不动作, 可靠系数 $K_b = I_{sc} / (n_{zb} \times I_{Nb}) \leq 0.9 \sim 0.8$

式中: K_d 为动作可靠系数; K_b 为不动作可靠系数; n_{zd} 为动作断路器短路电流整定倍数; n_{zb} 为不动作断路器短路电流整定倍数; I_{Nd} 为动作断路器额定电流; I_{Nb} 为不动作断路器额定电流; I_{sc} 为通过动作和不动作断路器的短路电流。

(3) 当上述动作电流不能满足选择性要求时, 应采用短延时脱扣器, 并使脱扣器的延时满足选择性配合要求, 即

$$t_d < t_b$$

式中: t_d 为应该动作的断路器的动作时间, ms; t_b 为不应动作的断路器的动作时间, ms。

5 采用蓄电池的直流设备

常用的直流设备为采用蓄电池为储能器件的直流电源设备。

5.1 电力系统少维护直流电源设备

直流开关设备由充电整流器、蓄电池组、自动调压装置, 及馈电回路等部分组成。充电机采用相控式整流调压, 三相全桥整流。设有自起动功能, 能在交流电源恢复供电后实现自起动; 充电机的均、浮充充电方式可手动或自动控制, 并设有充电机和电池过电压、欠电压报警及跳机控制。本系统将直流电源系统化繁为简, 按最简方式设计, 以实现产品性能最优化、故障最小化、可靠性最大限度得到提高。充电机设有过电压、过电流保护。采用大功率二极管模块组成降压硅链, 串入合闸母线和控制母线之间, 并配有调压控制器, 可实现自动或手动调压。系统中配有闪光装置、绝缘监测装置等必备装置。还可根据用户的要求加装智能蓄电池在线监测装置、蓄电池容量监测装置、便携式多功能蓄电池放电装置、智能微机绝缘监测装置、手执式绝缘接地故障定位装置、无级调压装置、直流斩波器、逆变器等配套装置。设备的蓄电池可选铅酸阀控电池, 也可选用镉镍碱性电池。以 PGD2 系列少维护直流电源设备为例, 技术数据如下:

- 交流输入电压(V): $380 \pm 15\%$, 三相四线。
- 直流额定输出电压(V): 220、110。
- 直流额定电流(A): 10, 20, 30, 50, 80, 100, 200, 315, 500。
- 充电稳压精度: $\leq 0.5\%$ 。
- 充电稳流精度: $\leq 0.5\%$ 。
- 纹波系数: $\leq 1\%$ 。

5.2 智能高频开关直流电源

智能高频开关直流电源设备是由交流进线单元、由高频开关电源模块组成的整流单元、系统监控单元、母线调压单元、蓄电池组及其监测单元、馈线单元等部分组成。其中显著的特点是笨重的变压器被现在的高频开关整流模块所取代, 增加了由 PLC (或单片机) 组成的直流系统监控部分、人机界面部分, 并且系统配置了智能蓄电池监测装置, 绝缘监测也一并接入系统监控中, 使整个系统更加人性化、使用

起来更加方便。

5.2.1 智能直流开关电源的特点

近年来，随着电子技术和通信技术的迅猛发展，变(配)电站逐步采用微机综合自动化控制，对直流操作和应急电源提出了越来越高的要求。在很多应用场合要求电源柜具有更高的自动化和通信功能。采用标准的、开放的现场总线(如 MODBUS-RTU 协议总线)的直流电源，将具有通信能力的智能器件连接起来，实现上位机、PLC 等通过总线对现场设备进行数据通信，从而达到对设备的远程控制、调节、测量、监视等功能。

GZS2(PGD7)总线式智能直流电源以可编程控制器(PLC)为控制核心与支持现场总线功能的传感器、控制器和执行器，组成现场总线网络，实现了对系统的充电状态、母线稳压、绝缘检测、事故报警等自动控制，并自动对蓄电池容量实时监测、定期充放电管理，是一种高度自动化的直流电源。系统特点：硬件集成化、标准化、模块化，强化软件功能，控制方式灵活、方便。主要体现在以下几方面：总线式、智能化、功能齐全、操作简单、结构新颖、便于维护。其结构采用模块化，N+1 冗余设计保证了产品的高度可靠性。根据实际运行情况，可由以下功能模块的全部或部分有机组合而成：符合防触电 I 类保护；利用断路器的短延时解决保护电器协调性；交流输入自动切换、交流电源异常报警，有效保护充电模块；设置防雷保护、有效保护充电模块；监控装置以数字技术为核心对系统充电状态进行跟踪；按蓄电池特性，自动循环运行与限流、稳压等充电状态；在蓄电池进行充电时，为稳压、限流、均充、浮充的转换与控制用微机完成，并提供数据通信接口；充电浮充电装置采用高频开关模块，N+1 冗余配置；充电模块智能控制，输出电流电压平滑调节，自主均流性能好精度高具有自动及手动两种工作方式；充电模块为自然冷却统一接口，通用性强，可带电热插板，更换维修方便；主母线用阻燃绝缘铜线，控制母线采用控制模块和降压硅链热备份；在线检测单体电池的电压、内阻，定期活化放电，自均衡充电有温度自动补偿；运行时自动监测各馈线的开关状态、绝缘状况，监控装置故障时，自动退出运行，不影响系统原参数整定及正常运行；防护等级为 IP30；柜体用 C 型材加强柜架。GZS2 型数控智能直流开关设备的产品外形图如图 3.9-6 所示。

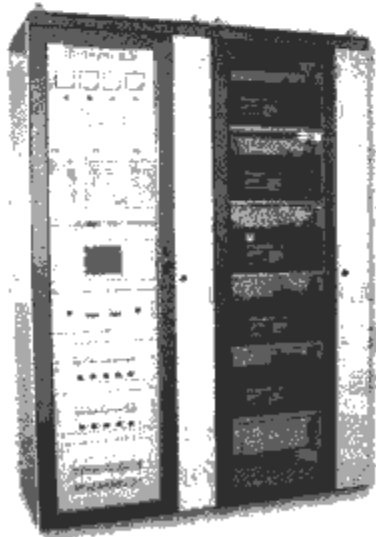


图 3.9-6 GZS2 型智能型直流电源外形图

5.2.2 主要技术参数

GZSZ(PGD7)型数控智能直流开关设备技术参数见表 3.9-7。

表 3.9-7 GZS2(PGD7)型数控智能直流开关设备技术参数

输入	电 压	AC380(1±15%)V	AC220(1±15%)V
	频 率	45~55Hz	45~55Hz
输出	直流额定电压	220V、110V	
	直流额定电流	控制 8~600A 动力 120~1000A	
	浮充电压	220(1+30%)V/220(1-20%)V	
	均充电压	110(1+30%)V/110(1-20%)V	
	纹波系数	均充<0.1%，浮充时<0.05%	
	稳压精度	<±0.3%	
	稳流精度	<±0.3%	
	保护动作电压精度	<±0.3%	

5.2.3 系统组成

5.2.3.1 监控单元

(1) 监控单元组成如图 3.9-7 所示。

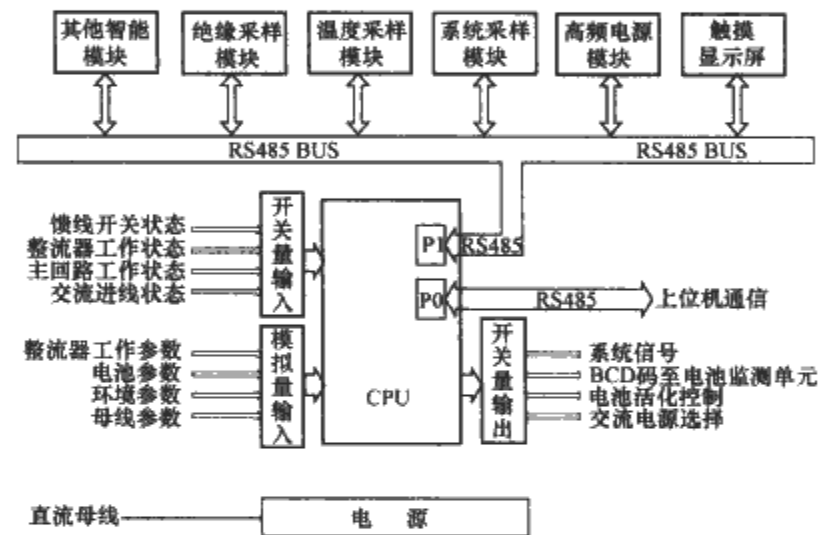


图 3.9-7 监控单元组成

(2) 监控单元的作用。

- 1) 控制显示，可在线修改整定参数，控制工作状态，显示运行情况。
- 2) 监控单元对整流模块实施监控，包括开关机、输出电压、限流点，自动选择最佳充电方式。
- 3) 监控单元可向电池监控单元发送 BCD 码，并接收电池的参数测量，进行分析处理，计算单体电池的容量、内阻，从而判定电池的性能。
- 4) 监控单元接收馈线绝缘测量参数，进行分析处理，计算馈线正、负极对地电阻，从而判定馈线的绝缘情况。
- 5) 监控单元可接收交流电源单元的参数及状态，并可根据此对交流电源进行切换、选择、报警（过或欠电压、缺相等）。
- 6) 监控单元可自动对电池进行充电、活化。
- 7) 监控支持多种常用的通信协议，如 Modbus、CDT 等，亦可根据客户要求定制协议；接口支持 RS485、RS232，亦可通过 Modem 上传数据。

5.2.3.2 整流单元

- (1) 由多个高频开关整流模块组成，模块并联运行，自动均流，N+1 冗余。
- (2) 模块特点。
 - 1) 智能化设计。模块内置微处理器，自动完成对模块本身的监控与管理，并与中央监控之间通信，接受中央监控

的控制,如果监控故障,则模块按微处理器出厂整定值运行。

2) 三相三线无中线供电,无源 PFC 校正,功率因数 >0.93 。

3) 模块采用软开关技术,无需缓冲网络,效率 $>95\%$ 。

4) 模块支持热插拔,扩容、维护方便。

5) 模块间采用低差自主均流方式,均流度 $<\pm 3\%$ 。

(3) 模块的工作原理如图 3.9-8 所示。



图 3.9-8 整流模块原理

5.2.3.3 馈线单元

(1) 单元由多个主开关、辅助开关、故障开关、直流漏电流传感器,多路选通器及母线监测等组成。

(2) 单元功能:

1) 主功能是直流配电,向各下级设备分配直流电能,并具有过电流、短路保护功能。

2) 向监控单元提供开关的状态(正常工作,正常分闸,故障跳闸)。

3) 向监控单元提供各馈线线路的漏电流,以便监控各馈线线路的接地情况;漏电流传感器采用直流霍尔元件,不需要向母线注入交流低频信号。

4) 可提供闪光电源。

5) 监测母线的过电压、欠电压,并向监控单元转发。

5.2.3.4 交流进线单元

1) 自动进行双电源切换,向后级设备、部件提供可靠的交流电源。

2) 监测交流电源的参数,提供过、欠电压,缺相等保护。

3) 必要的防雷措施,确保后级设备、部件的安全。

4) 必要的交流配电。

5.2.3.5 电池监测单元

(1) 单元功能:在线、动态地监测单体电池的电压,以便监控计算电池的内部电参数(内阻、容量等)。

(2) 特点:

1) 采用 MOS 固态电子开关选通,具有无触点、无抖动、寿命长、速度快、可靠等优点。

2) 三种控制方式。手动操作优先,监控控制次之,单元内部循环最次。

3) 两种输出格式。 $0\sim 5V$ 标准信号和 $0\sim 15kHz$ 调频脉冲同时输出。

4) 本体带有数码显示。

(3) 单元组成如图 3.9-9 所示。

5.2.3.6 母线调压单元

(1) 工作原理。反馈系统监测母线电压,并实时调整三极管的通态,当母线的变化超出三极管的调整范围,反馈系统发出脉冲、启动有级调整,此时无级调压实时跟踪母线变化,从而使母线实现平滑调整。母线调压单元组成如图 3.9-10 所示。

(2) 特点。

1) 以有级和无级接合的方式,实现母线的无级调压。

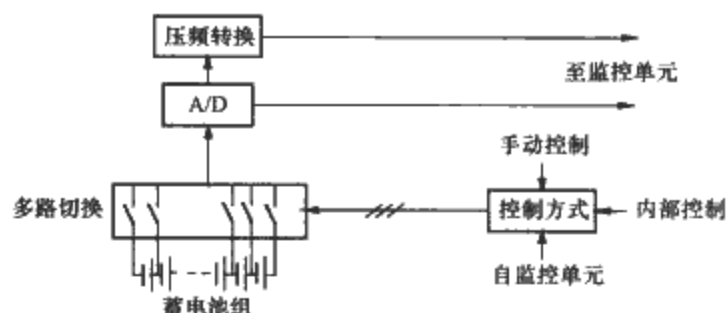


图 3.9-9 电池监测单元

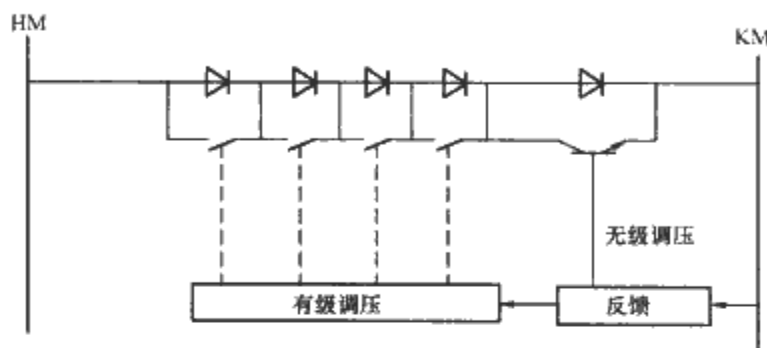


图 3.9-10 母线调压单元组成

2) 以硅链的简单可靠代替了斩波器的复杂和脆弱。

3) 具有线性电源的精度。

5.2.3.7 通信电源模块

此模块将直流电源母线电压经过 DC/DC 变换,获得 48V 直流输出,转作变电站通信设备电源,其结构与整流模块相近。性能:衡重杂音电压为 1mV,峰—峰值杂音电压为 100mV,效率 $\geq 90\%$ 。

5.2.3.8 逆变模块

此模块将直流母线电压经过 DC/AC 变换,获得交流 220V,50Hz 的正弦波电源输出,作为 UPS 使用。

(1) 结构框图如图 3.9-11 所示。



图 3.9-11 逆变单元

(2) 性能:

1) 可在线运行,热备用运行的切换时间 $\leq 5ms$ 。

2) 保护功能:输出过载、短路,输入过电压、欠电压、过热。

3) 效率: $\geq 90\%$ 。

4) 波形失真度: $\leq 3\%$ (线性负载)。

5) 环境温度: $(-10\sim 40)^{\circ}C$ 。

5.2.3.9 通信规约

(1) 通信接口:RS-485,通信距离 1000m(RS-232 另配接口)。

(2) 如用户无特殊注明,公司将提供 Modbus 协议(9600Bd,8 位数据,奇校验)。

5.2.4 主接线方案

(1) 方案一如图 3.9-12 所示。

(2) 方案二如图 3.9-13 所示。

(3) 方案三如图 3.9-14 所示。

(4) 方案四如图 3.9-15 所示。

(5) 方案五如图 3.9-16 所示。

6 阀控密封铅酸蓄电池

常用的直流电源设备大多是采用阀控密封铅酸蓄电池为储能器件。

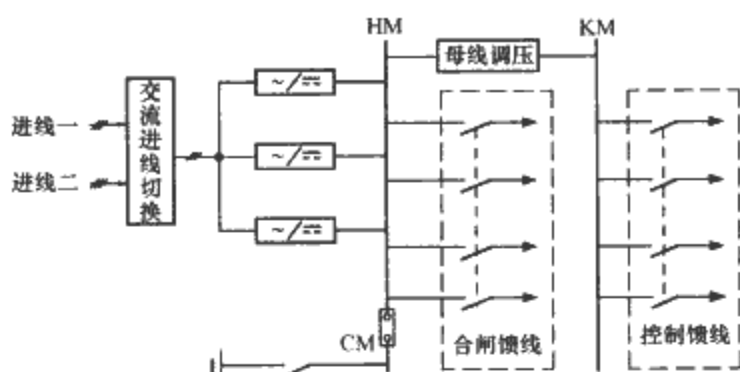


图 3.9-12 主接线方案一

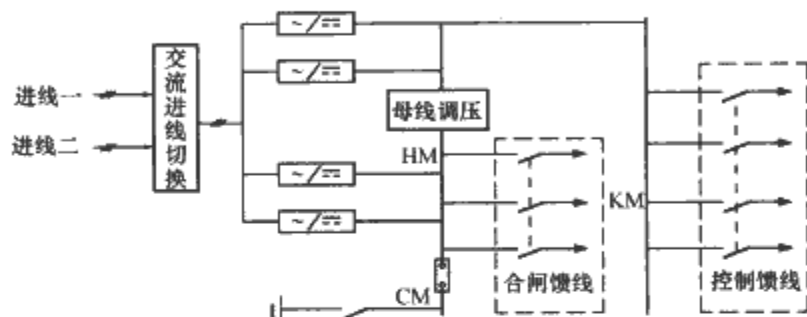


图 3.9-13 主接线方案二

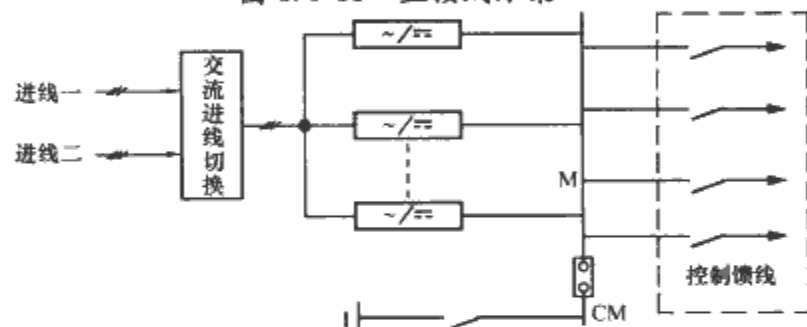


图 3.9-14 主接线方案三

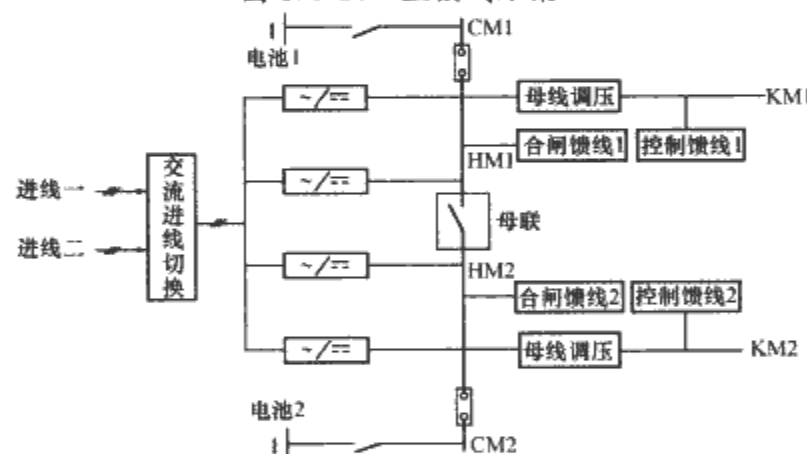


图 3.9-15 主接线方案四

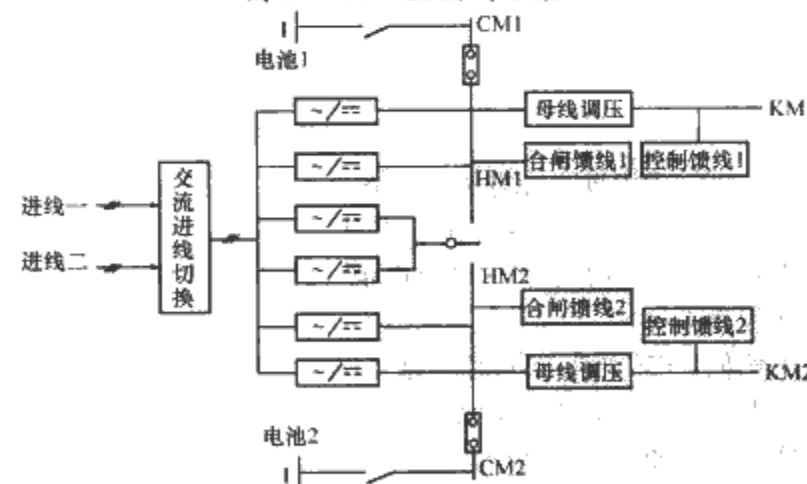


图 3.9-16 主接线方案五

6.1 工作原理及密封机理

6.1.1 工作原理

铅酸蓄电池的成流反应如下：在放电时，正极上的二氧化铅和负极上的海绵铅在硫酸电解液中进行电化学反应，生成硫酸铅和水，同时将电池储存的化学能转化为电能释放。

在充电时，正、负极板上的硫酸铅分别转化为二氧化铅和海绵铅，同时释放出硫酸，将电能转化为化学能储存于电池中。

6.1.2 阀控密封铅酸蓄电池的密封原理

对常规铅酸蓄电池，在蓄电池充电后期，充入的电流主要消耗在电解液中水的分解，导致在蓄电池的正极产生氧气，在负极产生氢气。这些气体从蓄电池中不断逸出，会导致电解液逐渐失水，从而导致蓄电池性能下降，甚至电池干涸。因此常规蓄电池需要定期补加水。

阀控密封铅酸蓄电池采用密封技术（或氧气再化合技术），即在设计上抑制氢气的析出，同时，使蓄电池充电后期产生的氧气在内部几乎完全再化合，无剩余气体排放。电池几乎不失水，因此该电池在整个使用过程中不需补加水。

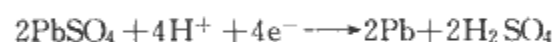
密封铅酸蓄电池充电后期以前的过程和常规铅酸蓄电池基本一样。但在蓄电池充电末期或过充电过程中，蓄电池充入的电量基本用于氧气的再化合过程，此时在电池内发生的氧气再化合反应如下：

(1) 正极上的反应（氧气的产生）

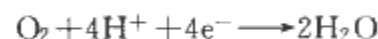


在正极产生的氧气，穿过超细玻璃纤维（AGM）隔膜到达负极表面并在负极发生一系列反应。

(2) 负极上的反应



负极上总的反应为



通过以上反应，在正极上产生的氧气穿过超细玻璃纤维隔膜传输到负极，完全被负极所吸收；正极上所消耗的水（电解液），在负极上的反应中又重新生成，穿过隔膜又回到正极，完成了 $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ 循环。负极活性物质经过一系列的反应，也完成了 $\text{Pb} \rightarrow \text{PbO} \rightarrow \text{PbSO}_4 \rightarrow \text{Pb}$ 的循环。使电池内多余的气体产生和纯净的物质（ H_2O 、 O_2 、 Pb 、 PbO 、 PbSO_4 ）生成。因此，电池不需要补加水，可以密封免维护。由于在不正常使用等特殊情况下，电池内反应平衡可能被打破，可能产生少量多余的气体，电池装有安全阀，当电池内气压超过一定数值时，安全阀开启，以便将多余气体排出；当电池内气压低于一定气压时，安全阀自动关闭，以隔绝电池外部气体进入，故该类电池又称阀控式密封铅酸蓄电池。

6.2 结构特点

(1) 外壳和顶盖。外壳和顶盖是采用特别耐用、耐冲击、高强度的 ABS 工程塑料制成。按需求，可提供阻燃级别的 ABS 材料。

(2) 安全阀。能精密控制电池的内部压力，确保电池的安全性及长寿命设计。

(3) 密封胶。独特的密封胶具有特强的黏结性，密封性能好，能有效对抗酸腐蚀，并可在高温和低温下继续发挥作用。

(4) 正极板和负极板。特殊的铅钙合金板栅具有良好的机械强度和耐腐蚀性。先进的活性物质配方能确保电池发挥优良性能。

(5) 隔板。纯度高，弹性好，空隙率高的超细吸附式隔板，大大提高了阀控式密封蓄电池的使用寿命。

6.3 电池容量确定

电池的容量与电池的放电率、终止电压、使用温度和电池使用年限有直接的关系。确定电池容量的计算应该包括温度和因电池使用年限造成的容量损失的因素。当 MF (12V) 电池的容量下降至额定容量的 50%，GMF (2V) 电池的容量下降至额定容量的 80% 时，通常被认为电池的使用寿命已经终止。

6.4 阀控式密封铅酸蓄电池的使用维护

6.4.1 初期充电（均衡充电）

在运输和储存期间，阀控式密封蓄电池会因自放电损失部分容量。因此，在投入使用前进行充电（均衡充电）。在浮充电过程中，若充电电压过低造成欠充电，则应再进行均衡充电。环境温度为 25℃ 时充电（均衡充电）的方法：

2V 电池充电电压 (V)：2.30~2.35×阀控式蓄电池个数

6V 电池充电电压 (V)：7.05~7.20×阀控式蓄电池个数

12V 电池充电电压 (V)：14.1~14.4×阀控式蓄电池个数

最大充电电流 (A)：0.25C₁₀ (2V 系列)，0.25C₂₀ (6V、12V 系列)

充电时间 (h)：6~8

如果环境温度低于 20℃ 或阀控式密封蓄电池存放时间较长，充电时间必须延长。在充电电压达到恒压值后，再充电 3~4h。

充电时，阀控式密封蓄电池表面的温度必须低于 45℃，如果表面温度超过 45℃，应立即减小充电电流或停止充电，否则可能损坏阀控式密封蓄电池。如果供电条件恶劣，停电频繁，应视情况进行定期均充。

6.4.2 浮充充电

在环境温度为 25℃ 时，浮充使用时的恒压充电方法如下：

2V 电池充电电压 (V)：2.23~2.27×阀控式蓄电池个数

6V 电池充电电压 (V)：6.75~6.90×阀控式蓄电池个数

12V 电池充电电压 (V)：13.5~13.8×阀控式蓄电池个数

上述充电方法是在间隔 10 天以上的相邻两次放电间采用的充电方法。否则，应视作为循环使用，并采用循环充电。

6.4.3 循环充电

在循环使用中采用恒压充电时，由于充电时间缩短，充电电压须比浮充充电时的充电电压高。因此，在环境温度 25℃ 时，循环使用时的充电方法如下：

2V 电池充电电压 (V)：2.35~2.40×阀控式密封蓄电池个数

6V 电池充电电压 (V)：7.20~7.50×阀控式密封蓄电池个数

12V 电池充电电压 (V)：14.4~15.0×阀控式密封蓄电池个数

最大充电电流 (A)：0.25C₁₀ (2V 系列) 0.25C₂₀ (6, 12V 系列)

在循环使用时，为保证阀控式密封铅酸蓄电池完全充足，除了提高充电电压外，充电时间的控制也是相当重要的。不同的放电深度下，阀控式密封铅酸蓄电池充足电所需的时间见表 3.9-8。

表 3.9-8 不同放电深度的充电时间

放电深度 (%)	充足电所需时间 (h)
30	8
50	12
70	16
100	24

如果未能确定放电深度，可在充电电压达到恒压值后，再延长 3~4h。

如果充电电压高于指定的电压且充电时间过长（即过充），可能引起阀控式密封铅酸蓄电池失水、漏液、热失控，加速极板腐蚀，导致使用寿命缩短。

如果充电电压低于指定的电压且充电时间过短（即欠充），可能引起极板活性物质硫酸化，容量降低，导致使用寿命缩短。

在环境温度超过 45℃ 时，对阀控式密封蓄电池进行长时间充电会损害阀控式密封铅酸蓄电池，所以必须在充电器中加入保护电路。

在循环使用时必须充足电，欠充是导致产生落后电池的主要原因。虽然过充和欠充对阀控式密封铅酸蓄电池寿命都有影响，但欠充对实际使用产生的不利影响更大，所以，必须确保阀控式密封铅酸蓄电池不会欠充。

6.4.4 温度补偿

过热会影响阀控式密封铅酸蓄电池的寿命。过热对阀控式密封铅酸蓄电池的伤害有以下特点：当环境温度超过 25℃ 时，如不调整充电电压，将影响阀控式密封铅酸蓄电池的寿命，每升高 10℃，阀控式密封铅酸蓄电池寿命将缩短 50%。

为了部分抵消温度变化产生的影响，充电电压必须使用温度系数进行校正。当环境温度升高时，充电电压必须降低。当环境温度降低时，充电电压必须升高。温度测量须在阀控式密封铅酸蓄电池表面进行，以环境温度为基准，温度系数如下：

2V 电池：0.003V/℃×阀控式蓄电池个数

6V 电池：0.009V/℃×阀控式蓄电池个数

12V 电池：0.018V/℃×阀控式蓄电池个数

不同环境温度下充电电压换算公式为

$$U_t = (T - 25) k_t$$

式中：U_t 为 t℃ 时与 25℃ 时充电电压差值；T 为环境温度；k_t 为温度系数。

例如，6V 电池 25℃ 时的浮充电压为 6.75~6.90V，当环境温度上升到 30℃ 时，浮充电压须降低为 6.71~6.86V。具体的计算如下：

$$U_t = (30℃ - 25℃) \times (-0.009V/℃) = -0.045V$$

$$\text{最小充电电压} = (6.75 - 0.045)V = 6.71V$$

$$\text{最大充电电压} = (6.90 - 0.045)V = 6.86V$$

在环境温度超过或低于 25℃ 时，采用温度补偿。温度补偿的采用并不完全抵消温度对电池产生的影响。由于阀控式蓄电池的温度与环境温度的变化速度不同，遇到温度发生瞬间和短暂的变化时，充电电压无需马上作调整，只需按平均温度设置即可。

6.4.5 放电

为获得最佳放电效果，必须按要求进行放电操作。放电时主要考虑的因素有标称容量、放电电流、放电时间、终止电压和环境温度。

例如 POWERSON、GMF 系列阀控式密封铅酸蓄电池是以 10 小时率放电所测的容量为额定容量。比如，GMF-200YR 型阀控式密封铅酸蓄电池的额定容量为 200A·h，即它在 25℃ 的环境温度下，以 20A 的放电电流放至 1.80V 的终止电压时，可连续放电 10h。

同时，在环境温度和放电电流不同时，阀控式密封蓄电池的有效容量将会不同。放电电流越小，有效容量越高；放电电流越大，有效容量越低。

此外，温度对阀控式密封蓄电池有效容量影响的一般规律为：环境温度低于 25℃ 时，每下降 10℃，阀控式蓄电池的有效容量下降 8%。所以在计算有效容量时，必须考虑环境温度。

虽然 POWERSON 阀控式密封蓄电池具有良好的深放电恢复性能，但在正常使用时终止电压的控制仍是必须的。否则将对阀控式密封蓄电池产生损害。如果阀控式密封蓄电池由于过放电而超过终止电压，即使通过充电，也将难以恢复它的最佳容量。虽然充电后它的电压能恢复正常，但它的容量仍会减少，寿命仍会降低。

6.4.6 使用寿命

阀控式密封蓄电池的使用寿命一般根据使用状态（循环使用或浮充使用）来定义。浮充寿命是指在 25℃ 下的浮充使用年限。循环寿命是指在 25℃ 下，以指定的放电深度进行充放电的循环次数。

6.4.6.1 浮充寿命

MF 阀控式密封铅酸蓄电池为例设计寿命如下：MF 系列阀控式密封铅酸蓄电池（33A·h 以下）为 3~5 年，MF 系列阀控式密封铅酸蓄电池（33A·h 以上）为 5~8 年，MF-H 系列阀控式密封铅酸蓄电池为 5~8 年，MF-T 系列阀控式密封铅酸蓄电池为 10 年，GMF 系列阀控式密封铅酸蓄电池为 10~15 年。

当环境温度和浮充电压改变时，阀控式密封蓄电池的使用寿命将改变，并有以下规律：当环境温度超过 25℃ 时，每升高 10℃ 或当单体电池浮充电压超出指定范围 0.03V 时，阀控式密封蓄电池使用寿命缩短一半。

6.4.6.2 循环寿命

阀控式密封蓄电池的循环寿命定义为在阀控式密封蓄电池的容量下降为额定容量的 50%（12V 系列）或 80%（2V 系列）前所能提供的循环次数。当放电深度不同时，循环寿命是不同的。表 3.9-9 给出了在不同的放电深度下，MF 系列阀控式密封铅酸蓄电池的循环寿命。

表 3.9-9 在不同放电深度时蓄电池的循环寿命次				
放电深度 型 号	20%	50%	80%	100%
MF 系列	1200	600	400	300
MF-T 系列	1500	800	500	400
MF-H 系列	1200	600	400	300
GMF 系列	2000	1500	800	500

6.4.7 定期维护

为获得最佳使用效果，阀控式密封蓄电池仍必须进行定期检测。以下是定期维护所需进行的检测项目。

6.4.7.1 环境温度和蓄电池温度

虽然阀控式密封蓄电池能在较宽的温度范围内使用，但它的理想使用温度范围为 20~25℃。在较低的温度下使用，会减少阀控式密封蓄电池的有效容量，在较高的温度下使用，会缩短阀控式密封蓄电池的使用寿命。

当环境温度超过 25℃ 时，每升高 10℃，阀控式密封蓄电池寿命减少一半。当环境温度过高时，必须改善通风或使用空调调节室温。

6.4.7.2 外观检查

检查外壳是否清洁，连接条是否松动，电池是否破损、泄漏、干涸，发现问题应及时现场维护，如果现场维护困难应及时与生产商联系。

6.4.7.3 系统浮充电压

阀控式密封蓄电池在 25℃ 时，所要求的系统浮充电压为阀控式蓄电池总个数乘以单体阀控式蓄电池的浮充电压范围：2.23~2.27V（2V 电池），6.75~6.90V（6V 电池）或 13.5~13.8V（12V 电池）。当阀控式密封蓄电池在其他温度下运行时，必须进行温度补偿校正。

如果阀控式密封蓄电池在放电后处于长期欠充状态，它将无法在充电时充足，提供的容量也会逐渐降低。这时需进行特别的均衡充电（比如 8~24h）。如果欠充状况维持过长的时间，极板将会产生不可逆的硫酸化，这时阀控式密封蓄电池也必须更换。

长期过充电会引起较大的浮充电流，使极板加速腐蚀，产生过多的气体，使电解液减少和干涸，使阀控式密封蓄电池寿命缩短，容量降低。这时必须更换整个系统的阀控式密封蓄电池。

6.4.7.4 蓄电池单体的浮充电压

如果单体阀控式密封蓄电池的浮充电压的测量值过低，说明该阀控式密封蓄电池有可能是一个容量不足或短路的阀控式密封蓄电池。如果单体阀控式密封蓄电池的浮充电压的测量值过高，说明该阀控式蓄电池有可能内阻过高。

6.4.7.5 内部连接阻抗

内部连接处的高阻抗和连接件的松动会导致充放电时电压降过大，延长充电时间、减少放电时间，极端情况下，甚至引起端子发热和熔化。所有连接件的表面必须清洁干净。

阀控式密封蓄电池经过一段时间的使用后，相互间的连接部位如果发生松动现象，需要重新拧紧。

6.4.7.6 性能与容量测试

阀控式密封蓄电池在长期浮充过程中，应在半年度维护中进行一次放电操作，可用负载或放电器按阀控式密封蓄电池额定容量的 30%~50% 进行放电，并记录放电时间和放电结束时阀控式密封蓄电池单体的电压。然后先用均衡充电的方法将阀控式密封蓄电池充电，再按浮充电方法进行充电。

当阀控式密封蓄电池的实际容量降至额定容量的 50%（12V 系列）或 80%（2V 系列）以下时，说明极板板栅已发生腐蚀和膨胀，极板的活性物质已劣化，电解液已开始干涸。该阀控式密封蓄电池须立即更换。

当发现阀控式密封蓄电池未能达到对系统支持所规定的最低时间，即使其容量仍大于额定容量的 50%（12V 系列）或 80%（2V 系列）也必须被更换。

例如，GMF2-200YR 型蓄电池在新的时候，能以 20A 放电 10h 以上。当它以 20A 放电时的时间低于 8h，这个阀控式密封蓄电池必须被更换。

6.4.7.7 数据分析与校正方法

在定期维护中所积累的数据必须记录下来,以便于分析和判断。由熟悉阀控式密封蓄电池的专业人员按这些记录分析和判断,并制定操作方案。

7 双电层电容器

双电层电容器(也有称超级电容器)近几年发展很快,是已进入实用时期的一种新型储能器件,既具有电容器特性,又能拥有电池的功能,被认为是电池和电容器之间的一种新型储能元件。

7.1 双电层电容器主要特点

双电层电容器主要特点为使用寿命长10年(电池一般为3~5年);在放电过程中,没有明显老化,对环境无污染;能连续充、放电可达10万次,(电池为300~500次);瞬时电流很大,单体最大放电电流2000A;有较广的温度范围(-40~65)℃。

双电层电容器特别适用于瞬时冲击负荷、低温环境。虽然双电层电容器已做到法拉级,它所存储的能量远不及蓄电池,作为短时通用能量源还不能取代电池。

7.2 双电层电容器及其蓄能原理

双电层(电荷层)电容器是采用在可极化电极和电解液间的双电层原理,形成静电场,在电极上用碳酸钙金属微孔并沉积纳米材料(或直接采用碳纳米管),形成超大极板,储存超级静电能量,制造的介于传统电容器与电池之间的储能器件。

双电层电容器的电极是一种微孔材料,引出电极为铝箔,类似电解电容器的阴极,中间用电解电容器纸作为两个极间的隔膜,在除了引出电极、微孔材料和隔膜外的所有空间均填充了电解液,这样做可以获得比深度腐蚀的铝箔的实际面积与空间面大得多的结果。同样,具有流动性的电解液可以与多孔化的电极紧密接触,使实际电极有了更大的极板有效面积。

作为电极的微孔材料,它的材料要求是:小的比面积,不大于2000m²/g。早期生产的双电层电容器为活性炭粉、石油焦基制备活性炭,近期生产的则使用一种金属海绵状微孔材料为骨架,沉积纳米等超微粉(0.1μm)或更小的碳纳米管,进行适当处理后,制备出的电极具有很大表面积,或利用碳纳米管。这样可大幅提高充、放电效率。平板电容器的极板面积愈大,电容量愈大,使其标称静电容量可达法拉级(0.1~50 000F)。双电层电容器单体的电压等级较低,多数为溶胶水系(0.6~0.8V)、溶胶有机系(2.3~5.5V)。对较小电压等级的单体,使用时串接达到用户要求的电压等级,如24V,48V,110V,220V,400V。

由图3.9-17可知从外观上看,双电层电容器和普通电力电容器没有大的区别。在外壳中充满电介质,将两只极板

(正极、负极)置于(悬浮)电介质中。当在两个电极上施加电压后,正极板存有正电荷,负极板存有负电荷,这就是双电层电容器的第一层。当极板(包括正极板、负极板)与电介质相接触(相对接触),在界面上形成的相反电荷,以平衡电解液的内电场,出现极化电极。这种极化电极的正、负电荷在两个不同相之间的接触面上,以正、负电荷间的极短间隙(大约)排列在相反位置上,这种电荷分布层叫第二电层。由于此电层的电偶极子距离非常小,加上作为极板的材料面积非常大,就形成了第二个电层的储能元件。通过极化电介质来储能,但无电化学过程。当两极板间电动势低于电解液的氧化还原电极电位时,电解液界面上电荷不会脱离电解液,双电层电容处于正常工作状态,如两极板间电动势超过电解液的氧化还原电极电位时,电解液将分解,为非正常工作状态。随着电容放电,正、负极板上的电荷被外电路泄放,电解液界面上的电荷响应减少。这个过程是物理过程,没有化学反应,性能稳定,与蓄电池的化学反应完全不同。

7.3 双电层电容器主要性能、参数

(1) 额定容量。额定容量是指在额定电流下放电容量,即在规定的恒定电流放电条件下,放电到端电压为零,所需时间与电流的乘积再除以额定电压的值。单体电容额定容量为0.5~5000F。额定容量测试条件:恒定电流以上的电容器(如1000F),规定充电电流为100A,200F以下为3A。由于其等效电阻比普通电容器大,因此充、放电时等效电阻产生的压降不可忽视,如2.7V、5000F电容的等效电阻为0.4mΩ,在以100A电流放电时产生了40mV的压降,约占额定电压的1.5%。在以950A电流放电时,将产生380mV压降,约占额定电压的14%,这样在额定电流下放电容量减少到88.5%。

(2) 额定电压。额定电压是可以使用的最高安全电压。此外电容还要承受浪涌电压,可以短时承受的端电压(通常为105%额定电压)。产品最高击穿电压为150%额定电压。如果电压超过单元的额定电压,将会缩短单元的使用寿命。应维持电压在要求的范围内,必须控制充电电压,以保证它不能超过每个单元的额定电压。单体工作电压12~400V。

(3) 额定电流、最大放电电流。额定电流是指5s内放电到额定电压的一半时的电流。单体最大放电电流100~2000A。

(4) 能量密度。能量密度为最大存储能量除以电容器的质量或体积,记为W·h/kg、W·h/L。

(5) 最大储存能量。最大储存能量为从额定电压放电到零所释放的能量,单位为J、W·h。

(6) 功率密度。功率密度有时也称能量密度,是在匹配的负载下电容器产生的电(热)效应各半时的放电功率,以J、W·h为单位。

(7) 等效串联电阻(ESR)。等效串联电阻为在规定的恒定电流和规定的频率下的等效串联电阻。恒定电流(如1000F)以上的电容器,规定充电电流为100A,200F以下为3A。规定的频率是DC大容量的100Hz或小容量的1kHz。通常交流ESR比直流ESR小,并随温度上升而减小。双电层电容器的等效串联电阻比较大是因为要充分加大电极面积,更由于原采用活性炭粉电极的电阻率就比金属大,这样双电层电容器的等效串联电阻比普通电容要大。

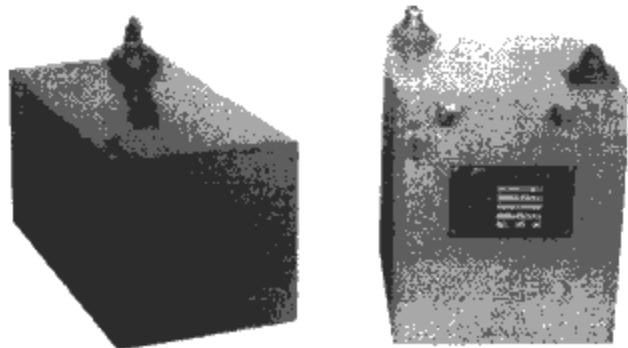


图3.9-17 双电层电容器外观

(8) 阻抗频率特性。阻抗频率特性是指在交流电流有效值为 1A 时, 频率为 10~200Hz 范围内是 60mΩ。

(9) 正常工作温度。通常为 (-40~+60)℃。

(10) 使用寿命。在 25℃ 环境温度下, 寿命为 10 年; 在 60℃ 环境温度下, 寿命为 4000h。寿命随环境温度变少的原因: 电解液随环境温度升高而蒸发。寿命终了的定义是电容量降低到额定容量的 20%, 或 ESR 增大到额定值的 1.5 倍。

(11) 循环寿命。充放电循环寿命 10 万次以上。在 20s 充电到额定电压, 然后恒压充电 10s, 再以 10s 放电到额定电压的一半, 间歇时间为 10s 为一循环。循环寿命终了的定义是: 电容量降低到额定容量的 20%, 或 ESR 增大到额定值的 1.5 倍。

7.4 双电层电容器应用中的一般问题

7.4.1 均压问题

双电层电容的单体, 由于受到电解液: 溶胶电化学性质, 电渗与电泳、分散相移动中沉降电动势的影响, 固液两相相对移动时产生的滑动界面所产生的电动势 (流动电动势 Zeta Potenti)。电池的电压比较低, 为几伏, 而通常应用的 24V, 220V 等电压等级, 就必须采用串联的办法。而串联, 就有均压问题。

7.4.2 发热问题

若双电层电容通过纹波电流 (充、放电时) 发热, 因为双电层电容的等效串联电阻在流过纹波电流时产生功率损耗, 并转化成热能。所发热量也将随着纹波电流的增加而增长。

7.4.3 漏电流问题

双电层电容器在通电的情况下, 通过内部并联电阻放电, 这个放电电流就称为漏电流, 它会影响超级电容器单元的自放电。电容器的电压在串联使用时需要平衡, 因为存在漏电流, 内部并联电阻的大小将决定串联的电容器单元上的电压分配。当电容器上的电压稳定后, 各个单元上的电压将随着漏电流的不同而发生变化, 而不是随着容值不同而变化。漏电流越大, 额定电压越小。漏电流会造成电容器单元放电, 使电压降低。为了补偿漏电流的变化, 通常采用的方法是, 在每一个单元旁边并联一个电阻, 来控制整个单元的漏电流。这种方法有效地降低了各单元之间相应并联电阻的变化。常用的漏电流检测电路如图 3.9-18 所示。

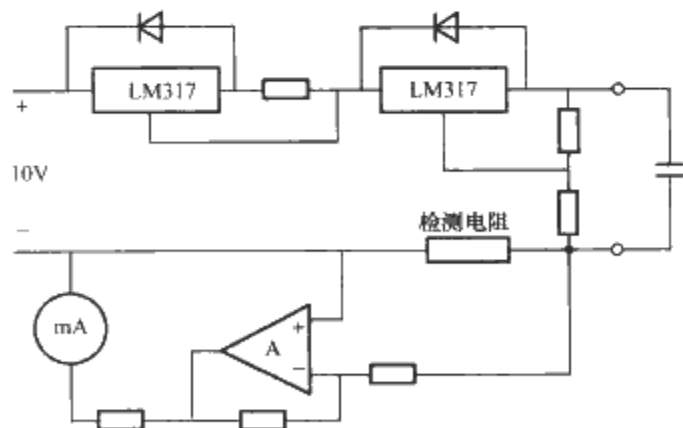


图 3.9-18 漏电流检测

8 双电层电容器直流设备的应用

近几年发展起来的双电层电容器 (以下简称电容器) 直流电源, 具有充放电速度快、效率高、长寿命、高可靠性、循环寿命长、使用温度范围宽、安全性高、对环境无污染等特点。广泛地应用在发电厂、变电站和其他电力工程中, 以及化工、化纤、造纸、医药、交通等行业。

8.1 为变电站合闸母线提供动力

直流设备是为发电厂、变电所的电气设备提供直流电源及停电后的备用辅助电源, 主要用在分、合闸方面。传统的高压柜的电磁操作机构的操作电流较大, 可达 200A 以上, 动作时间短约 200ms。电容器瞬时放电电流可达几百至数千安培, 比蓄电池的放电能力高出 10 倍以上, 因此在直流屏上作为合闸母线提供动力使用这种超大容量电容器有比蓄电池更好的性能特点。对于电动操作机构就有更大的优势, 一节或二节电容器就可取代整套蓄电池组。特点是结构简单、成本低、无维修, 市电停电后可保证近千次的分闸, 方便可靠。

8.2 补偿电网闪络

在化工、化纤、造纸、医药等行业连续生产的生产线, 一次意外的电网闪落往往给生产、设备、原材料造成很大的损失。如化纤企业一次闪络停电可造成少则几万, 多则几百万元的损失。利用双电层电容器的直流电源放电快、瞬时供电容量大的特性, 可补偿电网闪络, 避免由于电网闪络所带来的损失。

8.3 电动机车、拖车、牵引车的起动

单位电容器的最大有效供电量 2000A/s, 可为电动机车、拖车、牵引车的起动提供了一个巨大的起动电流。电容器的寿命经测试可达 10 万次以上的充放电循环免维护, 比蓄电池寿命长、维护简单。特别适合在全载条件下起动。

8.4 柴油机、汽油机的起动

蓄电池起动时的工作状况受环境温度影响较大, 低温时不能释放出一定的电流, 使得寒区冬季车辆起动时存在起动力不足甚至不能起动的问题。双电层电容器正常工作温度为 (-40~+60)℃, 使用双电层电容器直流设备将有效地解决上述问题。

8.5 动力机车及同类设备的制动

当需要对动力机车及同类设备进行制动时, 一个很大的反向电流经过叠加会对原有动力设备进行冲击, 通常是设备额定电流的 24 倍以上。这样形成机械惯性与电流“惯性”, 对设备有很大损害。利用电容器快速充电特性就可以对这些电流进行吸纳, 既可防止对机电设备的损耗, 又可以进行能量存储, 为下一次机电设备的再起动力提供了能量。既解决了冲击问题, 也节省了能源。

第10章 交流电动机软起动控制设备

1 交流笼型电动机软起动控制技术基础

1.1 交流笼型电动机的机械特性

1.1.1 交流电动机的机械特性

在使用或讨论交流笼型电动机拖动生产机械起动、运行等工作情况时，首先要查明电动机的机械性质和生产机械的特性相适应的情况。然而电动机起动、制动、停止过程中的工作情况和电动机的转矩变化特性及机械的阻转矩有关，也和转速有关。因此，为能正确设计选用电气传动产品并得到经济、可靠运行，就有必要知道这些特性。

交流电动机的机械特性：交流电动机的转速和转矩的关系 $n = f(T)$ 作电动机的机械特性，如图 3.10-1 所示。

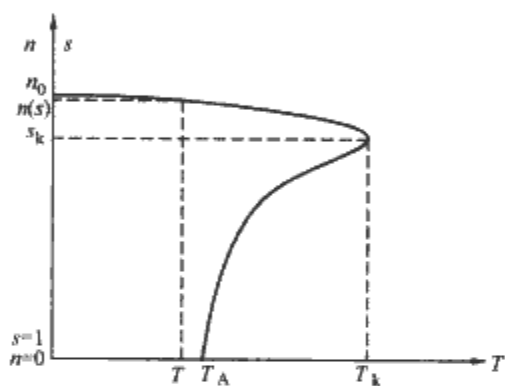


图 3.10-1 交流电机机械特性

T_c —电动机临界（最大）转矩； T_A —电动机堵转转矩； n_0 —电动机同步转速； s_k —电动机临界转差率； s —电动机转差率

下面给出对应图 3.10-1 电动机机械特性的电动机等效电路（见图 3.10-2）和它们的几种数学表达式。这些表达式与相应的机械特性将是讨论的电动机起动、运行、制动、停止的技术基础。

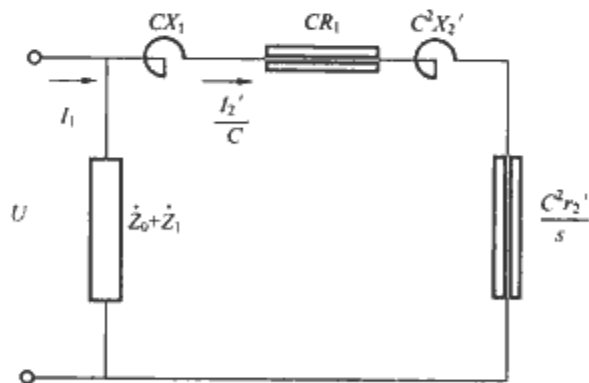


图 3.10-2 电动机等效电路

U —定子相电压； I_1 —定子相电流； I_2' —转子电流折算值； X_1, X_2' —一次、二次电抗折算值； r_2' —二次电阻折算值

这时有下列用电路基本参数表达的电动机转矩 T 为

$$T = \frac{3U^2 r_2'}{\omega_c \left[\left(r_1 + C \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + Cx_2')^2 \right]} \quad (3.10-1)$$

$$I_2' = \frac{U}{\sqrt{\left(r_1 + C \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + Cx_2')^2}} \quad (3.10-2)$$

式中： ω_c 为角频率； C 为电路变换系数； s 为转差率。

可看出电动机特性大致可分成两段，一段为 $s=1$ 到 $s=s_k$ ，这是一类似双曲线段，是特征曲线的非工作部分，实际上是电动机的起动状态段和制动状态段，是一不稳定工作段。另一段是 $s < s_k$ 到 $s=0$ ，它是电动机的工作部分，通常根据负载确定的某一工作点正是在这段中，只要系统不出现问题，本段就是电动机稳定工作段。

此处还应说明的是图 3.10-1 的曲线是在电动机定子直接接至电网条件下给出的一条唯一特性，也称电动机的固有特性。当然，当改变定子电压（一般设比定子额定电压小）时，其特性曲线将改变，如图 3.10-3 所示。这一曲线族称之为电动机定子电压变化后的机械特性曲线。

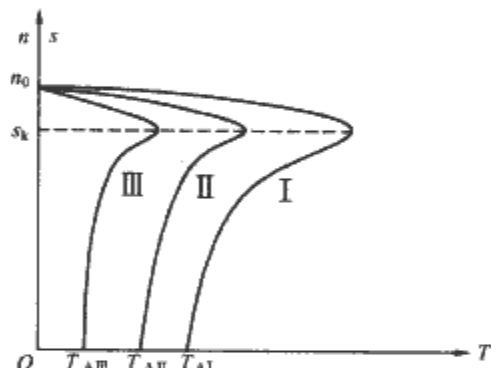


图 3.10-3 交流电动机调压机械特性

图 3.10-3 中曲线 I 是额定电压下的固有机机械特性，曲线 II 和曲线 III 是降压后的特性，并且电压 $U_I > U_{II} > U_{III}$ 。

显然，调整电动机电压后的机械特性其硬度远较固有特性小，这是转矩与端电压平方成正比的缘故。

第三个要讨论的问题是电动机起动电流。在图 3.10-4 中绘出电动机的电流与转速关系曲线 $n = f(I)$ ，为说明问题，同时将电动机固有特性绘于同一图中。由图看出电动机起动转矩小，大约为电机额定转矩的 1~2.0 倍；还可看出电动机的起动电流较高，是额定电流的 5~7 倍。两者的不协调，表明起动时电动机功率因数很低。这是因为起动时电能的消耗集中在建立电动机原磁场方面。

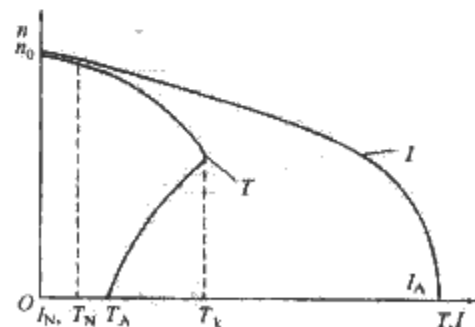


图 3.10-4 电动机的 $n = f(I)$ 特性

T_N —电动机额定转矩； T_A —电动机堵转转矩； T_c —电动机最大转矩； T —电动机转矩； I_N —电动机额定电流； I —电动机电流； I_A —电动机堵转电流； n_0 —电动机空载转速

1.1.2 电动机和生产机械的复合特性

如 1.1.1 节所说明的,电动机拖动生产机械运行的优劣要查明电动机的机械性质和生产机械的特性相适应的情况。为此,有必要将电动机特性和生产机械特性绘于一个坐标平面内。这种表达方式即称之为电动机和生产机械的复合特性。图 3.10-5 所示为典型交流电动机、负载转矩与速度关系。

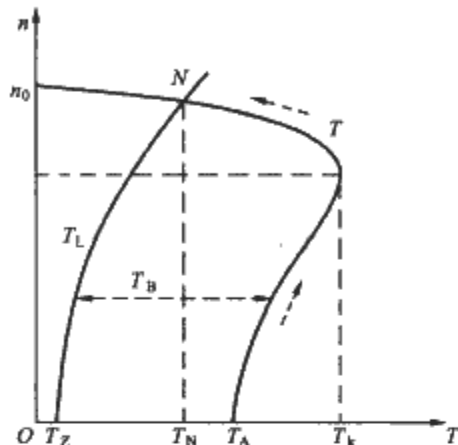


图 3.10-5 典型交流电动机转矩、负载转矩与速度关系曲线

T —电动机转矩; T_L —负载转矩; T_B —加速转矩;
 T_Z — $t=0$ 时的负载转矩; T_A —电动机固有特性的起动转矩(堵转转矩); T_N —电动机额定转矩; T_k —电动机固有特性的最大转矩; n_0 —电动机空载转速

由图 3.10-5 看出:

(1) 电动机与负载的合理匹配,需要 $T_A > T_N$ 时电动机方能获得足够的起动转矩,使生产机械投入运行。负载曲线与电动机固有特性的交汇点“N”是传动系统的稳定工作点。 T_A 点到 T_N 点的曲线即是电动机由静止不动到稳定工作的起动过程(如图 3.10-5 中 \rightarrow 所示)。

(2) 在起动过程中的任何点的 $T_B = T - T_L$, 即为这一时刻的电动机提供给负载的加速转矩,负载在电动机的作用下逐步加速并达到稳定工作。

1.2 交流笼型电动机的各种起动方式

1.2.1 交流笼型电动机全压起动

将电动机的定子直接接入电网,电机定子可获得电网的全电压,称之为电动机全压起动。全压起动的特点:高起动电流、高起动转矩、最短起动时间、只能直接起停电动机、起动装置价格便宜。图 3.10-6 所示为分别在轻载、重载、平方转矩负载条件下,转矩与速度的关系和电流与速度关系。

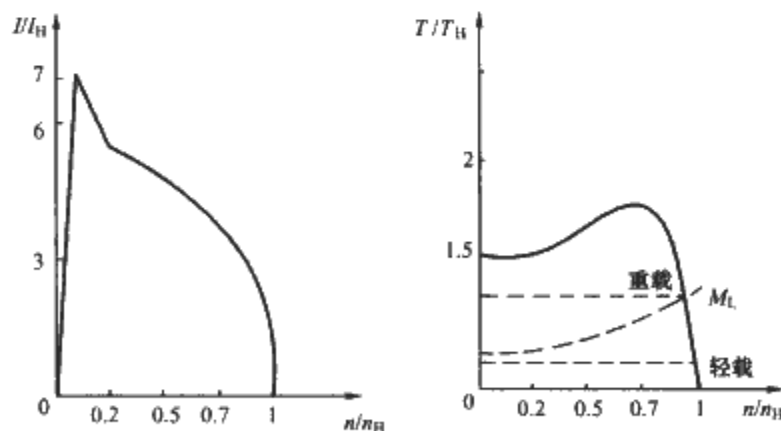


图 3.10-6 直接起动时转矩、电流曲线

1.2.2 交流笼型电动机 Y— Δ 起动

此时交流电动机的定子相绕组是分别被引出到电动机接线板上(共 6 个接线端子),电动机的工作状态取决于定子

相绕组的接法,就是说相绕组的工作电压是线电压还是相电压,即所谓的三角或星接法。利用电动机当工作在相电压下,其转矩降低的同时,电动机电流下降较多的特点,将电动机定子通过 Y— Δ 转换面先接成星形,然后再接到电源的起动方式,称为电动机 Y— Δ 起动,其特点是低起动电流(不能调节),低起动转矩,长起动时间,只能直接停止电机运行, Y— Δ 切换产生电流和转矩的尖脉冲冲击。图 3.10-7 所示为在轻载、重载、平方负载转矩条件下,转矩与速度关系和电流与速度关系。

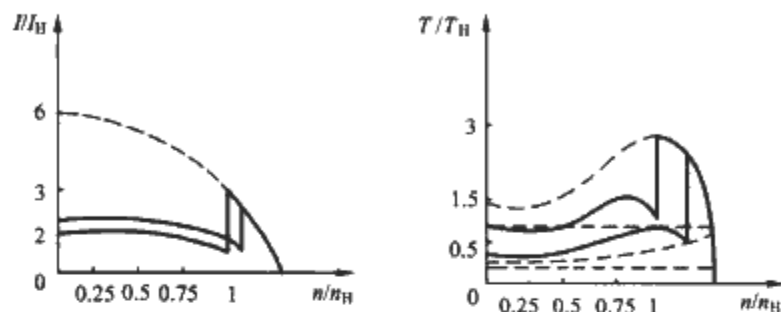


图 3.10-7 交流笼型电动机 Y— Δ 起动电流、转矩曲线

1.2.3 交流笼型电动机自耦减压起动

将电动机的定子通过可有级调整电压的自耦变压器接至电网的降压起动方式称之为电动机自耦减压起动。自耦减压起动的特点是:需加一台有抽头可调起动电压和电流的自耦变压器;起动时间长;在电压转换瞬间有尖峰电流和尖峰转矩;只能直接停止电机运行。图 3.10-8 所示分别在轻载、重载、平方转矩负载条件下,转矩与速度关系和电流与速度关系。

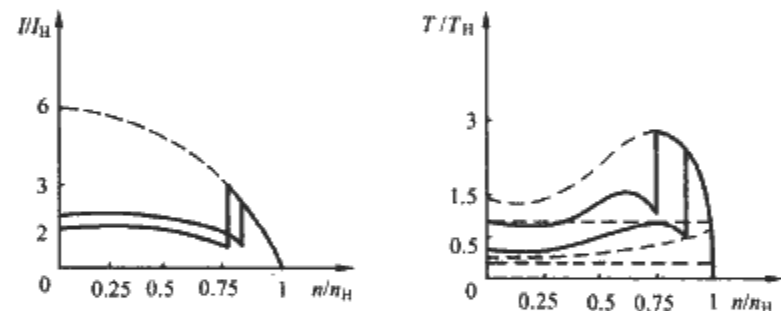


图 3.10-8 自耦减压起动转矩、电流

1.2.4 交流笼型电动机软起动

对电动机定子施以标准电压(电流)—时间特性,由某一基值电压上升至额定电压,同时电动机在控制(或限制)其转矩及冲击条件下,由零速静止平滑加速至额定转速或从额定转速缓慢停止的过程。通常将实现上述功能的电力电子装置称为软起动器,将软起动器及其为运行而配置的其他多个低压电器,测量、传感、调节或多台电机控制、起动的协调部分(如 PLC)等安装于一个有防护的外壳中,则称为电动机软起动装置(柜)。电动机软起动有如下特点:可调起动电流;可调起动转矩;可适当调节起动时间;可实现软停车;对机械设备和管道的磨损最小;可实现一台软起动设备逐步(同时)起动若干台电动机。图 3.10-9 所示为软起动的转矩与速度关系和电流与速度关系。

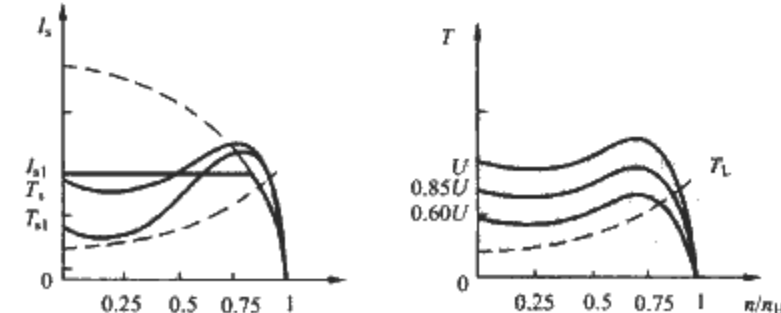


图 3.10-9 软起动的转矩、电流

1.2.5 交流笼型电动机各种起动方式比较

软起动方式是现代电气传动的最优方式，这一世界性的工业基础装备将在我国得到普及。表 3.10-1 为各种起动方式基本性能对比，表 3.10-2 为典型起动方式电压、电流、转矩对比。

表 3.10-1 各种起动方式基本性能对比

电气性能	全压起动	Y-△ 起动	电阻调节	自耦 变压器	软起动
堵转转矩	(1.5~2.8) T_H	(0.5~0.9) T_H	(0.5~0.75) T_H	(0.4~0.85) T_H	(0.06~2.8) T_H
起动电流	(4~8) I_H	(1.8~2.5) I_H	(1.5~6) I_H	(1.6~4) I_H	(1.5~6) I_H
需要的接线端子数	3 个	最少 6 个	3 个	3 个	3 个

表 3.10-2 典型起动方式电压、电流、转矩对比

起动方式	电动机 端电压 (%)	电动机起动 电流 (%)		电动机起动 转矩 (%)		电动机线 电流 (%)	
		堵转 转子 电流	全负载 电流	堵转 转子 电流	全负载 电流	堵转 转子 电流	全负载 电流
全压起动	100	100	600	100	180	100	600
自耦变压器 起动 (三种 抽头电压)	80%	80	80	480	64	115	64
	65%	65	65	390	42	76	42
	50%	50	50	300	25	45	25
Y-△起动	100	33	198	33	60	65	390
软起动	0~ 100	0~ 100	0~ 600	0~ 100	0~ 180	0~ 100	0~ 600

1.3 交流笼型电动机软起动的特点

1.3.1 交流笼型电动机软起动的各种控制方式

交流笼型电动机软起动的主要控制方式有两大类：通过限制起动电流和通过转矩控制。其目的都是在满足负载转矩需求的前提下，提供足够的加速转矩，实现带有负载的电动机平滑加速到额定值。

1.3.2 交流笼型电动机软起动及节能运行

1.3.2.1 软起动产品的节能运行

从软起动出现以来，有关人员在 20 世纪 80 年代初就对不同控制原理的软起动产品做过对比试验，其结论是：

(1) 在额定负载下，实际上是增加了功率消耗，主要是晶闸管串入主电路的压降损耗。

(2) 在 50%~80% 额定负载下，软起动器吸收的损耗与其节省的功率相当，主要是节约的铁损被增加的铜损抵消。

(3) 在 40%~50% 额定负载下，才收到较明显的节能效果。

软起动的节能原理与电动的电消耗机理密不可分，电动机在额定负载时效率很高，其功率因数大多在 0.7~0.9，其效率也在 80% 左右。但当负载减小时，上述指标就要下降，特别是当负载下降到 25% 的额定负载时，下降得更多。

电动机的基本损耗（或是说称其为与磁场有关的能量）有：

(1) 主磁场相对应的铁耗 P_F 。

$$P_F = KB_g^2 f_1 = \frac{3\omega_1^2 \Phi_g}{r_m}, \text{也可写成}$$
$$P_F = P_{FH} \left(\frac{U}{U_H} \right)^2 \tag{3.10-3}$$

式中： P_F 为基本铁耗； P_{FH} 为额定基本铁耗； U 为电动机端电压； U_H 为电动机额定端电压； K 为考虑铁心加工等因素使铁耗增加的修正系数； f_1 为定子频率； ω_1 为角速度； B_g 为气隙磁感应强度； Φ_g 为气隙磁通； r_m 为励磁电路电阻（铁心损耗的等效电阻）。

(2) 风阻和摩擦引起的基本损耗 P_s 与转速的三次方成正比，即

$$P_s \propto KN^3 \tag{3.10-4}$$

(3) 定子和转子的基本铜耗 P_C 为

$$P_c \propto 3I_1^2 r_1 \tag{3.10-5}$$

$$P_c \propto 3I_2^2 r_2 \tag{3.10-6}$$

(4) 杂散损耗 P_z ，凡不属于上述三种损耗的其他损耗均称之为杂散损耗，它与电流二次方、转速二次方成正比。

$$P_z \propto KI^2 n^2 \tag{3.10-7}$$

铸铝转子其值 1%~3%，铜质转子仅为 0.5%。

从这 4 类损耗看，风阻及杂散损耗占有的比例都较小，电动机的运行损耗主要是铁耗和铜耗。而在讨论的电动机节能运行问题（实际上是电动机稳态运行，而非电动机起动的非稳态运行）是稳态运行下的铁耗、铜耗的影响因素。显然负载电流越小，铜耗也越小（此时假定转子阻抗不变），而此时铁耗几乎不变。此时总损耗〔即铜耗（有功损耗）+铁耗（无功损耗）〕下降了，无功损耗没有降，导致总功率因数下降。唯有想办法在负载变小时，将铁耗降下，亦即式 (3.10-3) 中将电动机气隙磁通 Φ_g 降下，而

$$\Phi_g \propto \frac{E_g}{\omega_1} \tag{3.10-8}$$

与气隙电动势 E_g 有关，而

$$E_g = U - IZ \tag{3.10-9}$$

是定子电压矢量与定子损耗 IZ 矢量决定，也即只有降低施加在定子端电压，方能减少气隙磁通，提高功率因数，进而有降低了磁化电流及铜耗，又降低了铁耗，达到节能目的。

下面解释为什么会出现“随着负载大小变化，其节能效果不同，甚至有时不节能”的情况。

从式 (3.10-2) 可得转子折算电流 I_2' 为

$$I_2' = \frac{U}{\sqrt{\left(r_1 + C \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + Cx_2')^2}} \tag{3.10-10}$$

式 (3.10-10) 中，转子折算电阻 $C \frac{r_2'}{s}$ 和转子折算阻抗 Cx_2' 都与转差 s 有关。当负载率为 40%~80%，气隙磁通虽然降低些（但不能降低太多，仍要维持足够转矩保证 40%~80% 负载的需要），但此时转差 s 又不算大，进而降低又不多，电动机获取的部分能量降低的也不多，反而又引入的晶闸管调节电压电子电路压降，抵消了电动机降低能耗，故很难做到节约能源。通过本节讨论可得出的结论：铁耗随着电动机端电压平方倍下降，铜耗随着负载电流下降而下降。

1.3.2.2 软起动节能运行节能效果

软起动节能运行效果与负载大小、负载持续时间、电动机极对数、电动机转差率有关。

(1) 节电效果与负载的关系。例如，图 3.10-10 所示，22kW/4 极电动机在 10% 负载下，可获得 20% 节电率，而 110kW/4 极电动机同样在 10% 负载下，仅能获得 3.5% 节

电率,从而看出电动机容量越大,节能效果越差。不同容量 4 极电动机节电率见表 3.10-3。

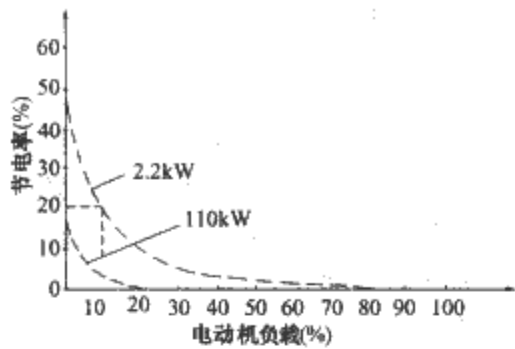


图 3.10-10 四极电动机负载与节电关系

表 3.10-3 不同容量 4 极电动机节电率

电动机额定输出容量		相对于全压运行的节电率 (%)
<5kW	<7.5HP	30
55kW	75HP	10
110kW	150HP	4
>110kW	>150HP	1

(2) 电动机的极对数、转差率与节电效果的关系见表 3.10-4。

表 3.10-4 转差率与节电效果的关系

极对数	节电率偏差 (%)	转差率 (%)
2	-0.5	0.5
4	0	2
6	+0.5	3.3
8	+1	5

若极对数并非 4 极,转差率也偏离了 2% 时,其节电率的估算偏差由表 3.10-4 给出。

2 交流笼型电动机软起动应用技术基础

2.1 负载转矩与负载转速

按负载转矩与负载转速的关系 $T = f(n)$ 特性确定控制方式: 转矩与转速二次方成正比, 记为 $T \propto n^2$; 转矩与转速成正比, 记为 $T \propto n$; 转矩与转速成反比, 记为 $T \propto 1/n$; 转矩为常数。

2.1.1 $T \propto n^2$

在工业设备中, $T \propto n^2$ 相对应的代表机械就是离心式水泵及离心风机。这里要指出的是: 不是所有的泵或风机都满足 $T \propto n^2$ 的关系。例如罗茨风机只满足 $T \propto n$ 的关系。

各类泵中, 只有涡轮型属于 $T \propto n^2$ 特性, 往复泵等容积式泵则不属于 $T \propto n^2$ 特性。而风机中往复式及旋转容积型—罗茨鼓风机不属于 $T \propto n^2$ 特性。

对于风机、泵类由静止状态起动瞬间要克服轴承摩擦转矩 (大约为额定转矩的 30%~40%, 甚至 50%); 对在泵、风机流体输送管道中的控制阀门或挡板的开放与关闭同样造成静压, 也影响起动转矩。对于它们的动态转矩, 即 GD^2 转动惯量, 也是软起动工程应用应注意的指标, 对泵—电动机传动系统其 GD^2 为泵电动机的 20%~80%, 对风机—电动机传动系统其风机的 GD^2 则是电动机的 10~200 倍。这也是

在起、停过程中重要的技术数据。如 GD^2 大, 则给定加速时间就要长些。同时, 由于惯性存在, 在停止操作后, 要有联锁, 在完全停止前, 不能再起动。各类泵的控制, 需设相位保护及慢速停车控制 (软停车)。各类风机控制时, 需有停机制动及过载保护。对于利用软起动装置起动这类设备, 一般采用转矩斜坡 (较大容量)。图 3.10-11、图 3.10-12 所示分别为泵和风机正确控制和非正确控制 (过大、过小), 供设计和现场调试时参考。

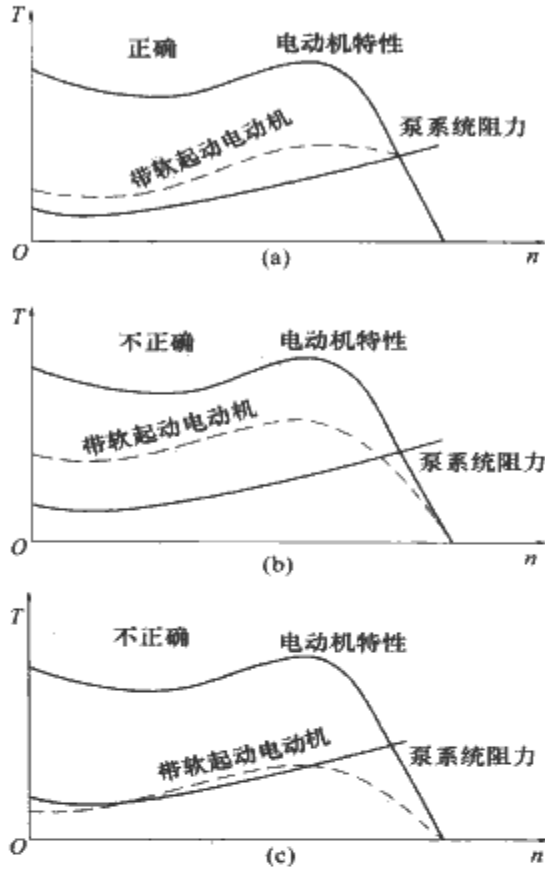


图 3.10-11 泵的控制特性
(a) 参数调正正确; (b) 加速转矩过高;
(c) 加速转矩过低

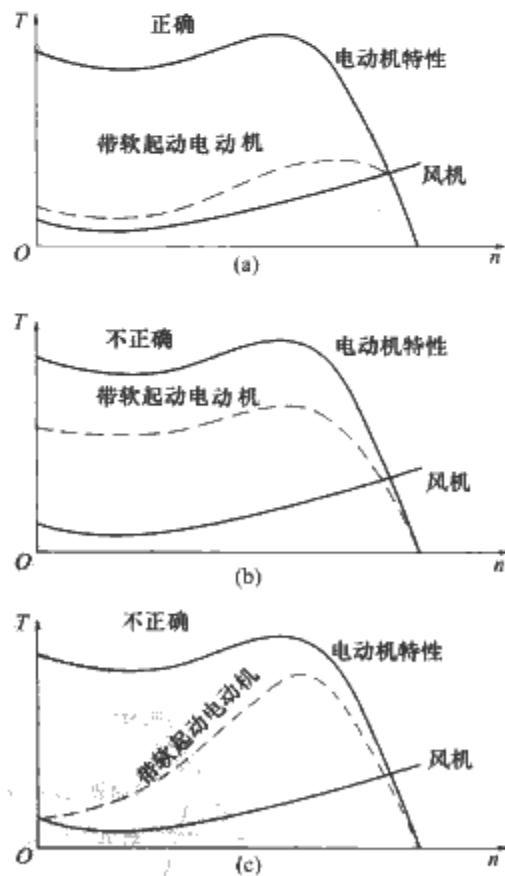


图 3.10-12 风机的控制特性
(a) 参数调整正确; (b) 起动电压过高;
(c) 斜坡时间过长

2.1.2 $T \propto n$

这类负载其转矩随转速变化而变化, 为恒变转矩 (见图

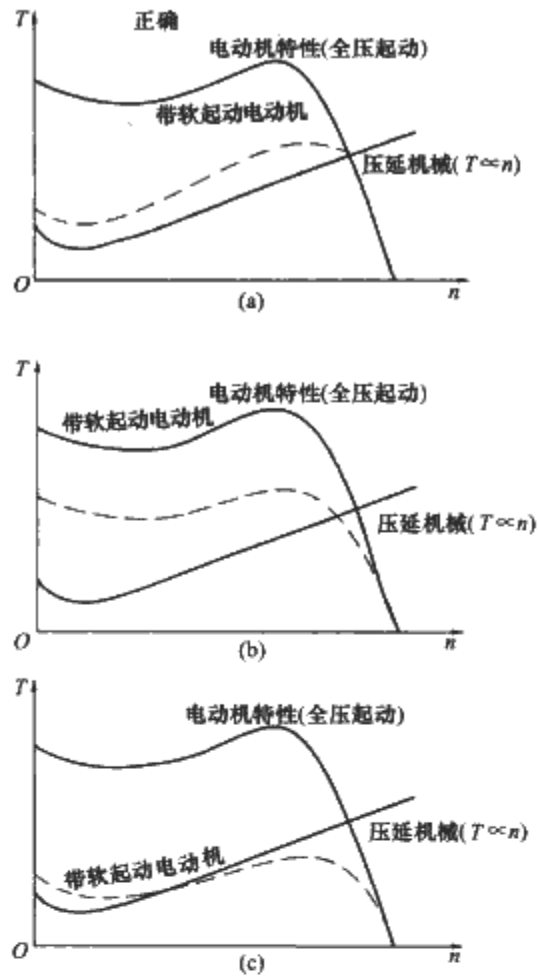


图 3.10-13 压延机械控制 ($T \propto n$)
(a) 参数调正正确; (b) 起动电压过高;
(c) 斜坡时间过长

3.10-13 中的负载特性)。这类负载的实例有：压延机械（轮压、轧光、辊筒压延）、纺织和纸张的压光机械、平整机械、螺旋输送设备等。压延机类型机械在起动之初，开始加

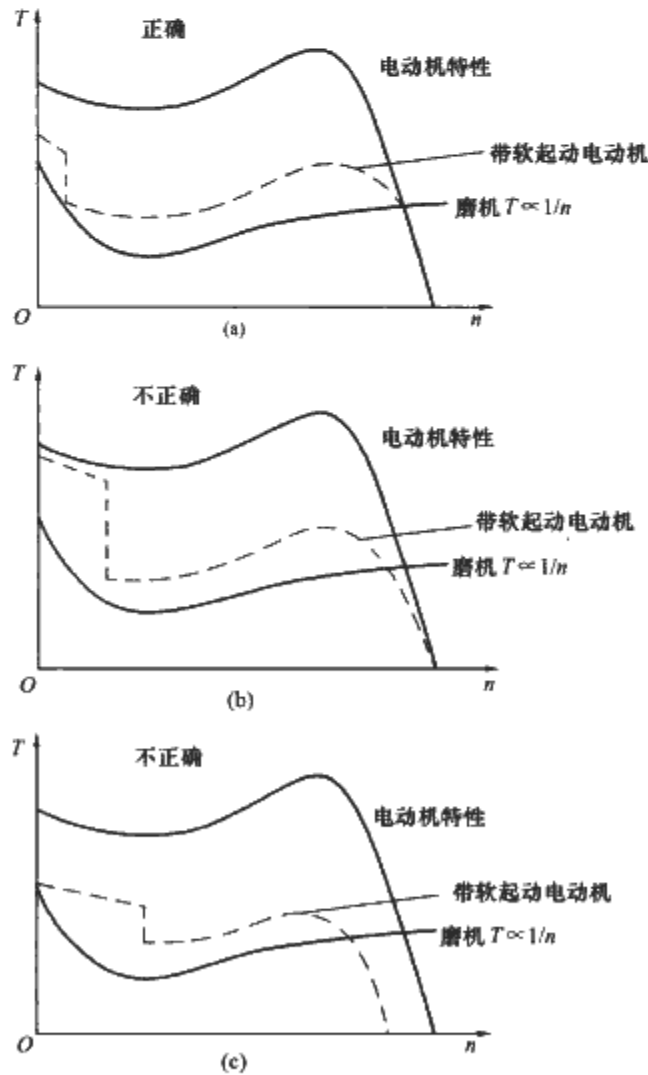


图 3.10-14 磨机、破碎机控制 ($T \propto 1/n$)
(a) 参数调整正确; (b) 起动突跳电压高;
(c) 突跳电压保持时间长

速，被压延的材料有一个相对方向的运动（即摩擦力），这时要一定惯性补偿，以保护材料的张力。同理在由恒速到停机的过程（软停止）中，也要在减速时给予惯性补偿（是减少转矩），保持张力。

2.1.3 $T \propto 1/n$

它在工业设备中，相应的代表机械是球磨机、车床旋转机械、压缩和剥皮机械机床，也有人称之为恒功率负载。它们的特点是：起动初始近似高起动转矩，在此以后，要保持自转或使传动加速时，随转速增加，转矩不再增加（见图 3.10-14 中的负载特性）。这类机械中的水泥熟料破碎机，有 50% 空载率，运行 2~3min，停车 2~3min 放料。其他磨粉机，风磨、水磨、碾碎机械有的也有类似特点。在控制上一定要施加带有加速转矩（脉冲转矩）的控制（见图 3.10-14 中的虚线所示）。此后，斜坡斜率值要小，斜坡时间要长，才能克服负载，满足加速要求，图中给出正确及不正确（过大，过小）的不同控制实例，供在设计和现场调整中参考。

2.1.4 $T = \text{常量}$

负载转矩 T 与转速 n 无关，记为 $T = \text{常量}$ 。
它在工业设备中，相应的代表机械是：起重机、电梯、传动带运输机、活塞泵、辊压机、包装机械、吹炼设备、自动梯、定量切削、工具、不带风扇的磨机等。图 3.10-15 以传送带传送为例说明运输机械这类负载的软起动如何控制。正确是在起动初始稍许增加点克服不太大的静摩擦转矩，即进入加速阶段。一般来讲不需要加脉冲转矩，否则就出现负载特性图 3.10-15 (b) 的情况，或者说图 3.10-15 (b) 是加入的脉冲转矩过大。

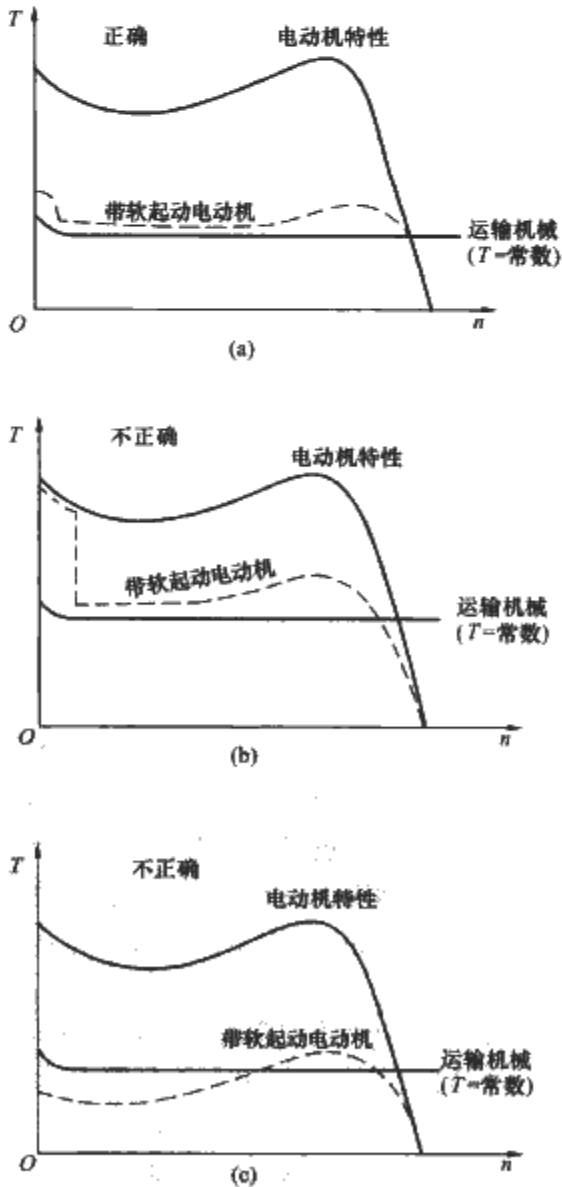


图 3.10-15 运输机械控制 ($T = \text{常量}$)
(a) 参数选择正确; (b) 起动突跳电压过高;
(c) 突跳电压保持时间长

2.2 按不同的工业设备工艺要求确定控制方式

2.2.1 泵控制及缓停车

不同类型电气传动设备的停车曲线如图 3.10-16 所示，有若干种方法，即直流制动、自由惯性停车、软停车。软停车是满足那些面对停车过程要求平缓的机械设备的需求。如泵，是防止速停，造成流体流速突变，引起压力骤变，俗称“水锤效应”。再如瓶装饮料生产线，急停易造成瓶破碎等。停车在控制上有两类：减速斜坡（见图 3.10-17）和转矩控制下的直流制动（见图 3.10-18）。前者称为软停车，后者在有的软起动产品中也配置并由用户自行选择。

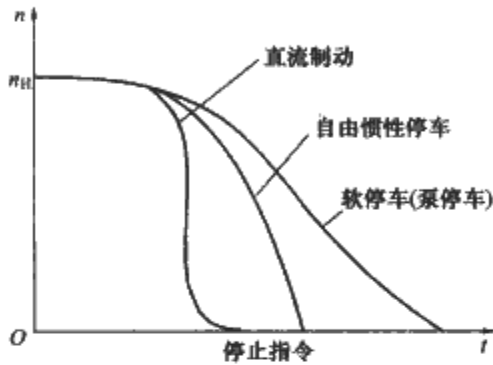


图 3.10-16 不同类型电气传动设备的停车速度曲线

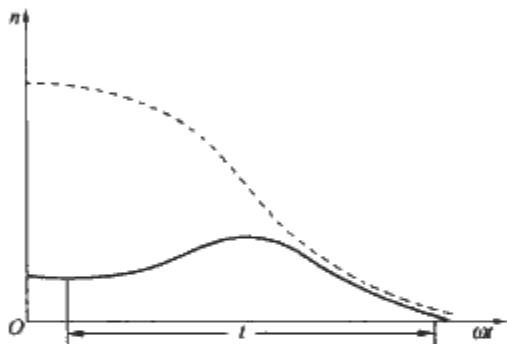


图 3.10-17 减速斜坡

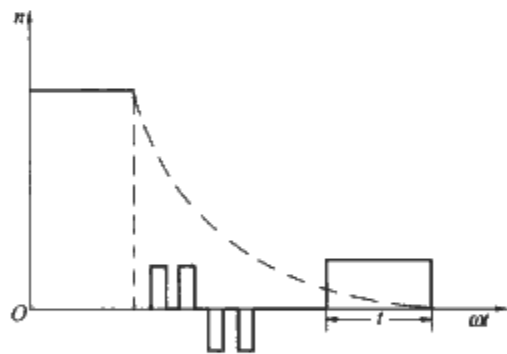


图 3.10-18 转矩控制下的直流制动

软停车的控制不同于一般传动的控制，如图 3.10-19 所示。一般的控制是将控制指定的时间 t_1 转换为 0 [见图 3.10-19 (a)]，而软停车的指令 [见图 3.10-19 (b)] 是在 t_1 时刻将电动机的端子电压从 U_N 下降到 U_1 ，然后从 t_1 时刻开始使电动机的端子电压缓慢下降到 U_e 。（软停车结束的电压）。图 3.10-20 所示为泵停车的实测变化曲线。图 3.10-21

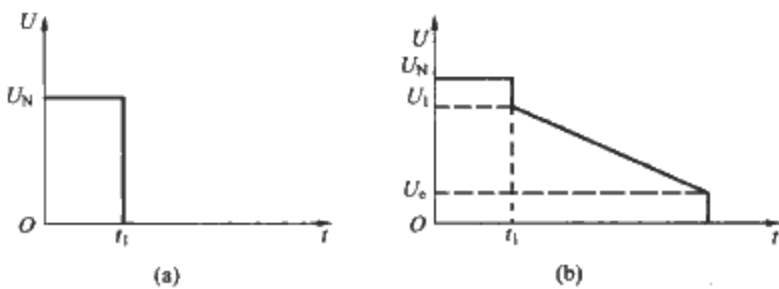


图 3.10-19 软停车控制
(a) 一般停车指令；(b) 软停车控制指令

所示为泵停车三种控制方式下停车示意图。

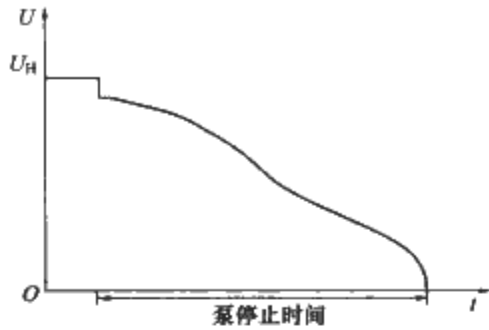


图 3.10-20 泵停车实测变化曲线

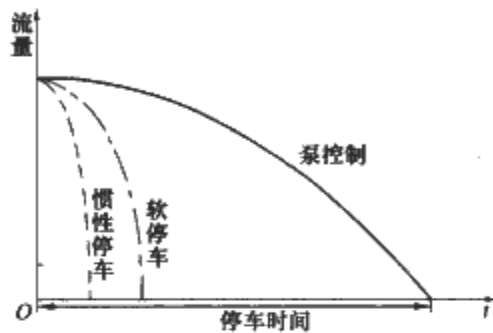


图 3.10-21 泵的三种停车方式

在这三种停车过程中，软停车是软起动可以选择的控制项目，例如在卷烟厂，但软停车的控制时间要依据生产线要求严格调整。泵控制软停车也是软起动可以选择的控制项目，时间较长，对提高泵使用寿命，降低振动，特别是防止硬停车使管道阀门破裂、爆裂，减少维修量，都有很大好处。这也是发明软起动后，在泵机械传动方面最大的贡献。泵软停车时间长短也需由现场整定。

2.2.2 风机控制及带载起动

风机无论其出口风门是关闭，还是打开，其起动转矩的近似值约 30%~50%，因此，皆属带载起动。也就是说在速度为零时，其转矩已有一确定值，这一值的产生是轴承的静摩擦阻力引起的静转矩。此外，风机控制的第二个特点是其飞轮转动惯量 GD^2 比较大，大约是电动机的 50~200 倍，故在考虑加速时向上要较长。另外还需指出风机的阻力曲线，即负载特性，是由风机特性、阻力特性所组成，阻力曲线又是流量的函数，将它记为

$$p = RQ^2 \tag{3.10-11}$$

式中： p 为出口压力； Q 为流量； R 为风阻。

阻力特性与风机的压力—流量曲线的交汇点即是风机的工作点（见图 3.10-22）。

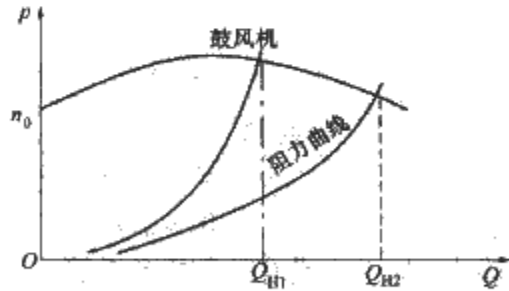


图 3.10-22 风机的压力—流量特性曲线

2.2.3 挤胶机、磨木机和大静摩擦负载

挤胶机、磨木机皆属于大静摩擦负载，它们的起动如图 3.10-23 所示。它在电动机起动过程中需要一个低速（约为 7%~15%）的啮合过程，然后起动直至运行，而在停车时，仍需要软停车控制。

对于像用链传动的生产机械等大摩擦转矩，可选择斜坡电压加突跳起动，它附加提供一个脉冲转矩（突跳），以克服负载，同时也避免了高起动转矩下起动过程。

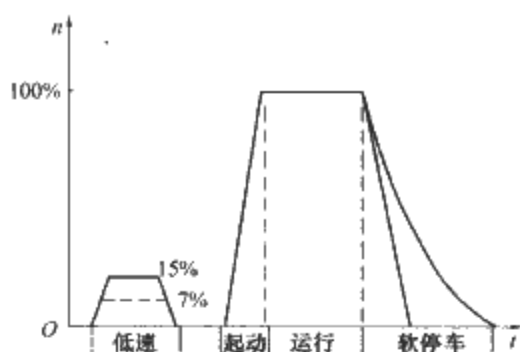


图 3.10-23 大摩擦负载特性曲线

2.2.4 自动灌装生产线与长缓停车

这类负载（见图 3.10-24）要求延长停车时间，这样可减少停车过程中负载移位和液体逸出。这是缓停中的长缓停类。在有的软起动设备中有类似长缓停的整定，给出可选功能，供特殊用户选用。

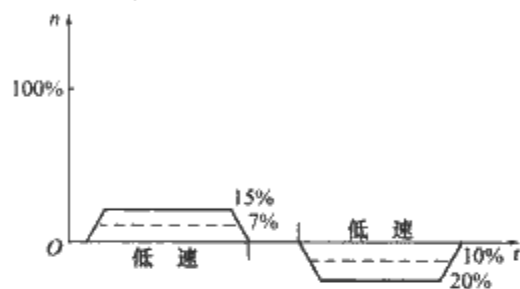


图 3.10-24 罐装生产线

2.2.5 空气压缩机和间隙负载

由空气压缩机组成的空气压缩站分布在许多工业领域。例如重型机车制造厂、铁路列车段，直至最近许多城市出现的以燃气为能源的汽车加汽站。它们的共同特点是间隙负载，几乎工作带载时间与空转不带载时间相同，负载曲线的占空比接近一半，并且是属于一种长期工作制，两台以上机台互为备用。因此，这些负载若采用软起动投入在线运行，其节能效益比较显著，它们的负载运行曲线如图 3.10-25 所示。

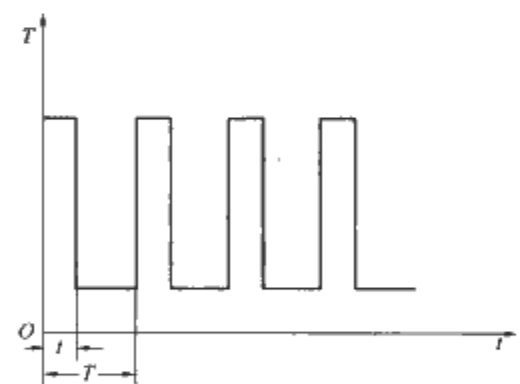


图 3.10-25 空气压缩机负载运行（间隙运行）

2.2.6 小电网下电动机软起动

小电网下的软起动的代表工况就是自备电站供电情况下的电动机软起动，此外像在变压器容量较小工况下如何确定电动机软起动的方案，也是有类似技术问题。

下面举一自备发电站供电，使排烟风机（消防用）顺利实现软起动的计算实例。已知，发电机带计算负荷 $P=470\text{kW}$ ，带 110kW 水泵起动时母线允许降压系数限制于 0.8 ，试计算起动容量并和 $Y-\Delta$ 起动对比评价。

解：若选 $Y-\Delta$ 起动，则起动容量 P_f 为

$$P_f = (P_z - P_m) + P_m k_g c X_d \left(\frac{1}{\Delta E} - 1 \right) \\ = [(470 - 110) + 110 \times 7 \times 0.33 \times 0.25(1/0.2 - 1)] \text{kW} \\ = 614 \text{kW} \quad (3.10-12)$$

式中： P_z 为应急电源总计算容量， kW ； P_m 为起动单台电

机最大容量， kW ； X_d 为发电机暂态阻抗，取 0.25 ； k_g 为电动机起动容量系数，取 7 ； c 为电动机起动方式系数， 0.33 ； ΔE 为发电机母线容许瞬时压降，一般取 $0.1 \sim 0.2$ 。

若选择软起动

$$P_f = [(470 - 110) + 110 \times 7 \times 1.6/7 \times 0.25(1/0.2 - 1)] \text{kW} \\ = 535 \text{kW} \quad (3.10-13)$$

本例实际运行参数：空载起始电压 $U_0 = 40\% U_N$ ，上升时间 $t = 20\text{s}$ ，限流 $I = 1.6$ 倍实测起动电流 543A （电动机电流 340A ）。

关闭风门起动：起始电压 $U_0 = 55\%$ ，上升时间 $t = 40\text{s}$ ，限流 $I = 1.6$ 倍实测电流 551A （尖峰冲击 1020A ，电机机流 340A ）。

结论：利用软起动要求起动容量减少 14% ，起动时电流（以尖峰冲击为例）冲击 3 倍。远比全压起动和 $Y-\Delta$ 起动小。

2.2.7 印染机械的软起动

印染机械以及类似的造纸、胶片、印刷机械、细纱机械。它们生产线的产品都比较薄、细，还要防止破、断，故利用软起动后使绵纱，避免了因阻力过大而断纱。这类设备使用软起动时的斜坡电压不大，斜坡时间较长。

3 交流笼型电动机软起动设备的工程应用

3.1 交流电动机软起动参数计算基础

3.1.1 交流电动机软起动转矩平衡方程

交流电动机软起动转矩平衡方程也称电动机惯性系统运动方程。当负载转矩为 T_L ，电动机转速额定值为 N 时，电动机惯性系统运动方程为

$$T_B = \frac{GD^2}{4g} \frac{2\pi}{60} \frac{dN}{dt} \quad (3.10-14)$$

式中： T_B 为加速转矩 $= T_M - T_L$ ， $\text{N} \cdot \text{m}$ ； T_M 为电动机转矩， $\text{N} \cdot \text{m}$ ； T_L 为负载转矩， $\text{N} \cdot \text{m}$ ； GD^2 为电动机飞轮转矩+换算到电机轴上的负载飞轮转矩； N 为转速， r/min ； t 为时间， s ； g 为重力加速度， m^2/s^2 。

3.1.2 加速、减速时间的确定

由式 (3.4-1) 可知由于由零速加速至速度 N 所用的时间 t

$$t = \frac{GD^2}{375M_B} \int_0^t \frac{dN}{dt} \quad (3.10-15)$$

根据式 (3.4-15)，如能给出加速转矩 T_B ，则能求出加速时间 t_1 ，而若给出减速转矩，则能求出减速时间 t_2 。若式 (3.4-15) 积分时，以最简单的情况，当阻力矩 $T_L = \text{常量}$ ， GD^2 为常量，则

$$t = \frac{GD^2}{375(M - M_c)} \quad (3.10-16)$$

实际上考虑到转矩的变动，转矩 T 用其平均值给出，下面以两例说明。

【例 3.10-1】一传送带的传动电动机 3.7kW ，四极电动机，归算到电动机轴上的转动总惯量 $GD^2 = 0.212\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，负载转矩最大转矩 $T_{L\max} = 15\text{N} \cdot \text{m}$ ，最小负载转矩 $T_{L\min} = 12\text{N} \cdot \text{m}$ ；求电动机加、减速时间。

解：求取速度变化差 ΔN （其中 0.03 为转差率）

$$\Delta N = \left[\frac{120 \times 50}{4} (1 - 0.03) - 0 \right] \text{r/min} = 1455 \text{r/min}$$

求取电动机电磁转矩 T_m

$$T_m = \left(\frac{975 \times 3.7}{1455} \right) \times 10 \text{N} \cdot \text{m} = 24.8 \text{N} \cdot \text{m}$$

求取加速时间 t_1

$$t_1 = \left[\frac{0.212 \times 1455}{375 \times (2.06 \times 1.1 - 1.5)} \right] s = 1.07s$$

其中系数 1.1 为实际整定加速系数。

求取减速时间 t_2

$$t_2 = \left[\frac{0.212 \times 1455}{375 \times (2.06 \times 0.2 + 1.2)} \right] s = 0.13s$$

其中系数 0.2 为减速系数。

显然本例讨论的是负载转矩为恒值常数，而对平方转矩负载，可见下例。

【例 3.10-2】 平方转矩下的加减速时间计算。由于平方转矩的性质，负载转矩随速度大幅度变化，仅用平均加、减速转矩作为加速时的做功转矩是不合适的。为此提出下面公式。

$$\text{加速时间 } t_1 = \frac{GD^2 N_{\max}}{375 T_{A\min}} \quad (3.10-17)$$

式中： $T_{A\min}$ 为最小加速转矩， $\text{kg} \cdot \text{m}$ ； N_{\max} 为最高转速， r/min 。

$$\text{减速时间 } t_2 \geq \frac{GD^2 N_{\min}}{375 T_{A\min}} \quad (3.10-18)$$

$T_{A\min}$ 、 $T_{D\min}$ 可用图 3.10-26 表示。

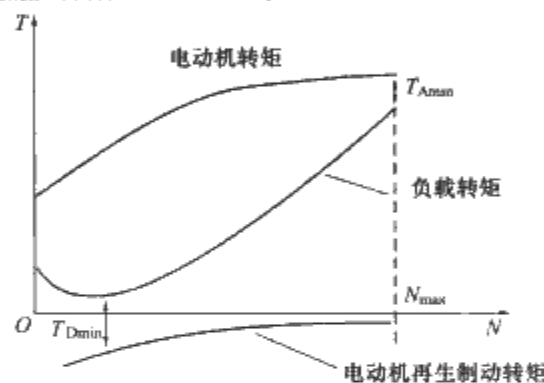


图 3.10-26 最小加、减速转矩

实际上除设计者外，多数都不计算，这里给出的只是工程整定前的预置参数，供参考。

3.1.3 惯性转矩 GD^2

惯性转矩有时也称飞轮转矩，它是为使静止物体在一定时间内加速到某一速度时物体质量的度量，它与物体质量形状有关，工业应用的是以 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 为单位。一般在软起动参数整定时都要求设计者给出这一数值，本章也给出通用负载的 GD^2 参数值范围。这里还需指出的是，若电动机通过齿轮机与负载相联，那么在 GD^2 计算时，要考虑减速比的折算。如设减速器的效率 100%，电动机侧减速齿数 Z_1 ，负载侧减速齿数 Z_2 ，则

$$N_2 = \frac{Z_1}{Z_2} N_1 \quad (3.10-19)$$

$$T_2 = \frac{Z_2}{Z_1} T_1 \quad (3.10-20)$$

折算后转动惯量

$$GD_1^2 = \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 GD_2^2 \quad (3.10-21)$$

式中： T_2 、 T_1 分别为负载侧电动机侧转矩； N_2 、 N_1 分别为负载侧电动机侧转速。

3.2 采用软起动时基本参数工程整定

3.2.1 斜坡电压起始值

斜坡电压起始值 U_s 如图 3.10-27 所示，在计算中引用的参数定义如图 3.10-28 所示。

$$U_s = U_N \sqrt{\frac{T_{L0} + 0.15 T_N}{T_A}} \quad (3.10-22)$$

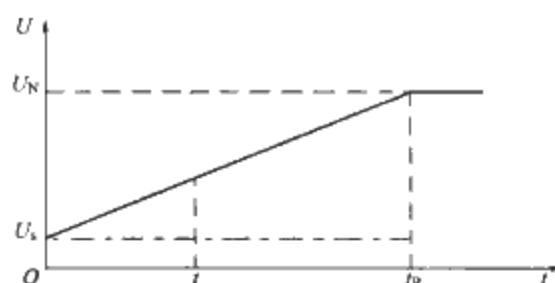


图 3.10-27 斜坡电压

U_s —起始电压； U_N —额定电压，V； t —运行时间，s； U_R —起动积分时间，s

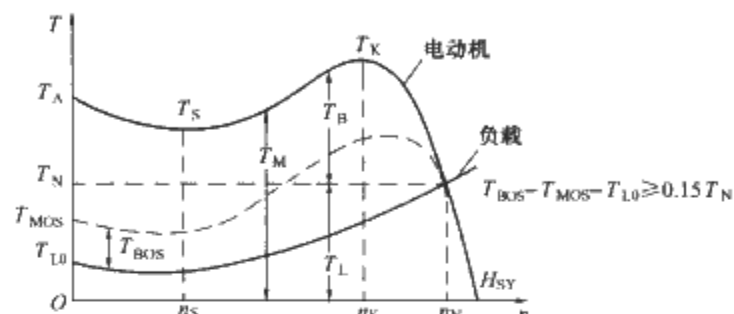


图 3.10-28 典型交流电动机与负载转矩—速度关系

T_L —负载转矩； T_{L0} — $t=0$ 时负载转矩； T_B —起始电压电动机加速转矩 $T_A - T_L$ ； T_A —电动机固有特性的起动转矩（即堵转转矩）； T_N —电动机额定转矩； T_{MOS} —软起动 $t=0$ 时电动机转矩； T_{BOS} —软起动 $t=0$ 时加速转矩

式中： T_{L0} 为 $t=0$ 时负载转矩； $T_{L0} + 0.15 T_N$ 为 $t=0$ 时加速转矩； T_A 为 $t=0$ 时全压起动时电动机转矩。

与 U_s 起始电压对应的起始电流 I_s 为

$$I_s = I_N \frac{U_s}{U_N} \quad (3.10-23)$$

式中： I_s 为施加起始电压后的起始电流； I_N 为全压起动时的起始电流。

式 (3.10-22) 是根据图 3.10-29，使电动机由某一速度加速到某一速度，转速变化量 Δn 时，所需加速转矩 T_{BOS} 。再根据电动机端电压与转矩关系 [式 (3.10-1)] $\Delta T \propto \Delta U^2$ ，转换推导出。关于 T_{BOS} ，工程上设定为

$$T_{BOS} = T_{L0} + 0.15 T_N \quad (3.10-24)$$

即，要在负载转矩 T_{L0} 基础上留有 15% T_N 额定转矩的富裕（见图 3.10-29）。

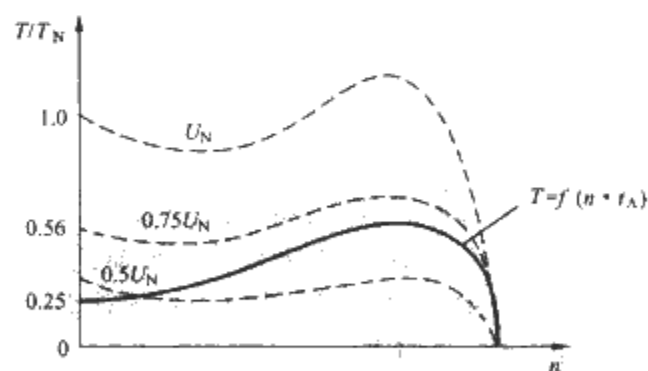


图 3.10-29 纯调压软起动

如图 3.10-30 所示，通过限压降低了起动电流，其结果压低了电动机速度与转矩曲线，但由于电动机特性在制动转矩的最低点（ $n=0$ ）有一负阻不稳定工作区，因而要求电动机转矩要高于负载转矩 15%，这是最低的要求。

3.2.2 斜坡时间 t_R

所谓斜坡时间，就是使电动机从零速起达到额定转速所经过的时间。它可由下式算出。

$$t_R = t_{dol} \frac{U_N}{U_s} \quad (3.10-25)$$

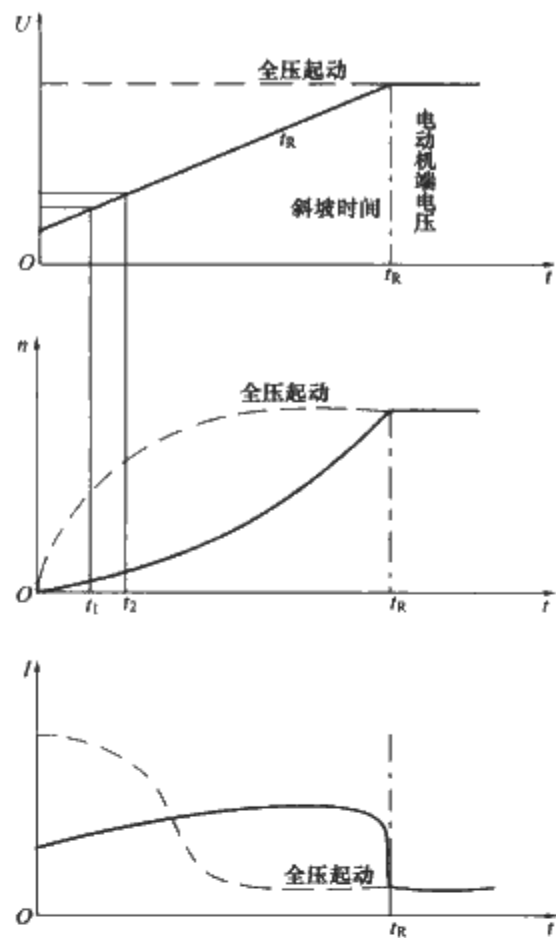


图 3.10-30 软起动的电压电流与转速的关系

式中： t_{del} 为电动机在 Δ 接法下全压启动时间，s。

还可求得图 3.10-30 中任一时刻 t_1 或 t_2 的时间（克服惯量的时间）为

$$t_1 = \frac{2\pi}{60} J \Delta n \frac{1}{T_{BOS}} \\ = \frac{1}{9.55} J \Delta n \frac{1}{T_{L0} + 0.15 T_N} \quad (3.10-26)$$

其中， $J \leq 10 J_d$ ， $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ； $T_{BOS} = T_{L0} + 0.15 T_N$ ，N/m。

然后，再根据图 3.10-28 和式 (3.10-14)，先计算出 t_1 时刻的加速转矩 T_{B1} ，计算出加速到 Δn 后的 t_2 。

T_{B1} 加速转矩为

$$T_{B1} = (U_1/U_N)^2 T_N - T_{L1}$$

这是根据图 3.4-28 的比例关系和式 (3.10-1) 的物理概念直接得出

$$t_2 = \frac{1}{9.55} J \Delta n \frac{1}{T_{B1}} \quad (3.10-27)$$

式中： J 为电动机+负载（计算到电机轴）转动惯量。

如将式 (3.10-27) 改写，可得到一求取时间的公式，即对应限制电压下的启动时间

$$t_2 \geq \frac{J \Delta n}{9.55 (U_1/U_N)^2 T_{bev} T_{Lav}} \quad (3.10-28)$$

其中， J 为 $J \geq 10 J$ 电动机，电动机转动惯量的 10 倍； U_1 为施加于电动机的端电压； T_{bev} 为电动机加速转矩平均值； T_{Lav} 为负载转矩平均值。

3.2.3 启动电流限制值

采取限流方案可以使启动电流的波形良好，可获得比只施加斜坡电压（限压）好的启动效果（见图 3.10-31）。

从图 3.10-32 可得出，限制启动电流的结果。启动电流限制值由下式算出

$$\text{启动电流 } I = I_N \frac{U_s}{U_N} \quad (3.10-29)$$

或

$$I_B = I_{AN} \sqrt{\frac{T_L + 0.15 T_N}{T_s}} \quad (3.10-30)$$

式中： T_s 为电动机堵转转矩； I_B 为电流限制值； I_A 为启动

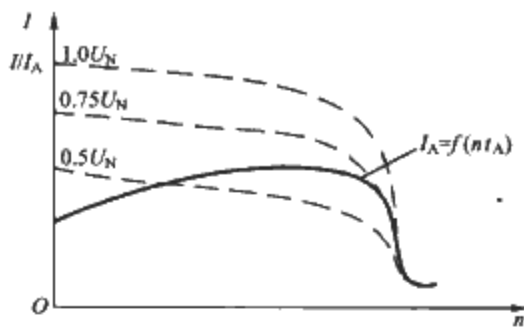


图 3.10-31 带限流的软启动

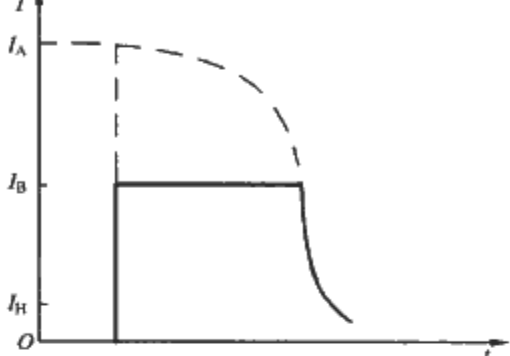


图 3.10-32 依电流控制限制启动电流

电流； T_L 为负载转矩； T_N 为电动机额定转矩。

3.2.4 脉冲持续时间

对于重载设备，也可通过软启动装置实现平滑启动，问题是在施加斜坡电压之始，同时给出一个尖峰电流。以尖峰电流给电机提供一个加速转矩，克服负载转矩后实现软启动如图 3.10-33 所示。例如对起重（吊车）传动要有足够的启动时间实施启动时间，约 100~300ms，而对钢铁设备、压碎机等，这一时间大约需要 1s。

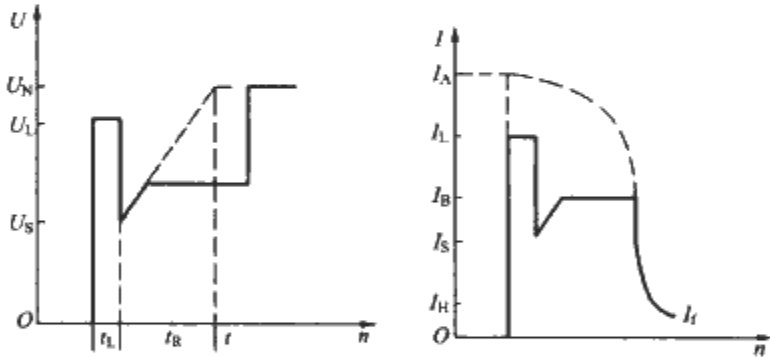


图 3.10-33 带脉冲电流的启动

U_L —突跳电压； t_L —脉冲电流式突跳电压保持时间

3.3 各类设备选用软启动工程参数整定

尽管本节的大部分叙述的都是工程用软启动装置参数计算方法，除去工程设计者外，许多用户仍感到计算麻烦，特别是在某些基础数据不全的情况下，很难做出准确计算。为此，本节将推荐一组常用装备软启动基本参数估算值（见表 3.10-5），仅供参考。

3.3.1 负载类型

表 3.10-5 共推荐了 23 种应用机械，未包括所有的应用机械；但可在表中找到依此类推的参数，只要将负载规并到 $T = f(n)$ 一类，查表即可。

3.3.2 负载转矩的基本数据

所有计算依据多数是负载转矩的特征值，为此表 3.10-5 给出了启动转矩与额定转矩相比的比例和总折合惯量/电动机惯量的倍比，这是估计起始电压、起始电流、启动时间的重要依据。

3.3.3 负载工艺特点及控制要点

表 3.10-5 给出的工业负载为典型负载，还有许多负载没有包括其中，但可据负载类型类推。

表 3.10-5 各类负载选用软起动工程参数整定表

应用机械	负载类型	起动转矩额定 负载转矩	总折合惯性矩 电机惯性矩	负载工艺控制要点	起始电压 电流 (%)	起动时间 (s)
离心泵	泵类 $T \propto n^2$	40%	1	慢速停机，负载保护，防止相位颠倒 保护	300	5~15
离心风机	风机 $T \propto n^2$	40%	15	提供停机制动转矩，检测阻塞物造成的 过载（负载）	350	10~40
离心式压缩机	风机或重载 >30s $T \propto n^2$	50%	15	防止相位颠倒保护，停止自动排空气体	350	10~40
离心过滤 （分离）机	风机 $T \propto n^2$	20%	30	防止相位颠倒保护，停止自动排空气体	300	10~40
活塞式压缩机	压机 $T \propto n$	50%	1	防止相位颠倒保护，停止自动排空气体	350	5~10
螺旋式压缩机	压机 $T \propto n$	10%	1	防止相位颠倒保护，停止自动排空气体	300	3~20
活塞泵	泵类 $T = \text{常量}$		0.2~0.8	检测泵运转方向即运行中的干燥剂	350	5~10
风机	风机或重载>30s $T \propto n, T \propto n^2$	40%	10	提供停机制动转矩，检测阻塞物造成的 过载（负载）	300	10~40
冷缩机	风机 $T = n$			电动机保护	300	5~10
传送带运输机 传送带机	$T = \text{常量}$	100%	10	检测故障的过载控制或检测损坏的负载 控制	300	3~10
电梯提升机	碾机 $T = \text{常量}$	100%	10	检测故障的过载控制或检测损坏的负载 控制及变化负载恒定起动	350	5~10
T 型缆车	传送带机 $T = \text{常量}$	100%	10	恒定起动，检测阻塞过载控制；软停 车，制动控制	400	2~10
螺旋输送机	传动带机 $T \propto n$	100%	5	检测恶劣环境的过载和损坏时的欠载	300	3~10
圆锯 带锯	传动带机或重载 >30s, $T = \text{常量}$			快速制动	300	10~60
搅拌机	碾机 $T \propto 1/n$	120%	10	工作电流显示搅拌材料密度	350	5~20
拉丝机	压机 $T \propto n$	20%	10		350	5~40
粉碎机	碾机重载 $T \propto 1/n$	100%	10	停机时限制振动，检测阻塞时过载控 制，高起止转矩	400	10~40
热泵	泵类 $T \propto n$	40%	0.5		350	5~10
切料机	碾机重载 $T = \text{常量}$	100%	10	控制起动转矩	400	3~10
压延机 滚压机	压机重载 $T \propto n$	120%	15	停机限制振动，检测阻塞的过载	450	5~60
精炼机	标准负载	100%	10	控制起动停止转矩	300	5~30
压力机	压机或重载	120%	15	增加工作周期的制动	400	20~60
车床	$T \propto 1/n$	100%	3		350	5~10
备注	风机中容积式属 $T \propto n$ ，其他类属 $T \propto n^2$					

4 交流笼型电动机软起动的电路方案

4.1 交流笼型电动机软起动的单电机主电路方案

4.1.1 接触器—熔断器电路

由软起动器组成的控制电动机起动装置，除去主要电器设备——软起动器外，为了实现与电网、电动机之间的电连接可靠工作，仍需施加起保护协调与控制作用的低压电器如刀开关、熔断器、刀熔开关、断路器、热继电器、快速熔断器等，下面将依实现功能不同、线路配置不同，分别叙述。

在软起动电路中值得推荐的是接触器—熔断器组如图

3.10-34 所示，即所谓 F—C 电路。即使不使用软起动的平滑起动，而用硬起动，F—C 电路也是一很好方案。需要说明的是某些软起动无需加装快速熔断器，其产品的电子保护已经保证可靠运行。但主接触器仍要接入，否则电动机侧仍带电。这是由于旁路接触器打开后，通过软起动使电动机仍带电。只有在软起动器的上侧接一只接触器（见图 3.10-35），当其断开后，电动机不再带电。

4.1.2 断路器—接触器电路

这一种接线方式（见图 3.10-35）是多数软起动采用的首选方案，其中断路器既可采用带热磁脱扣器的塑壳开关，也可采用单有电磁脱扣的塑壳断路器。

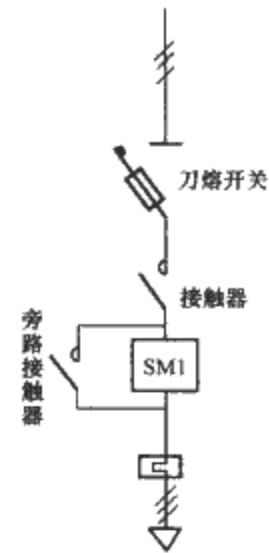


图 3.10-34 接触器—熔断器方案

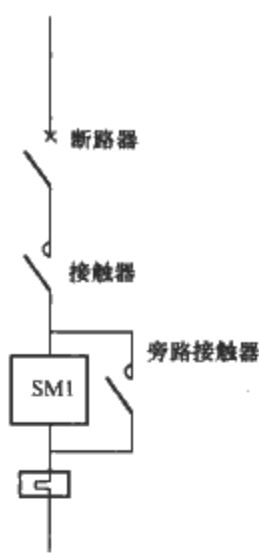


图 3.10-35 断路器—接触器方案

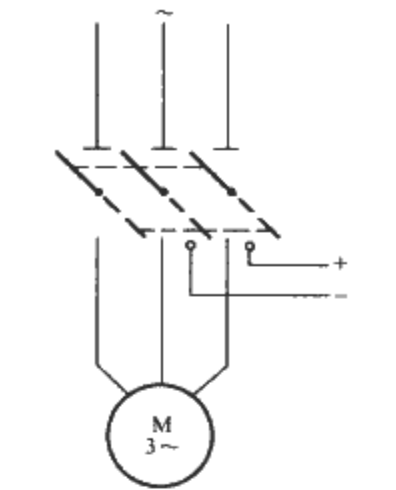


图 3.10-38 直流制动原理图

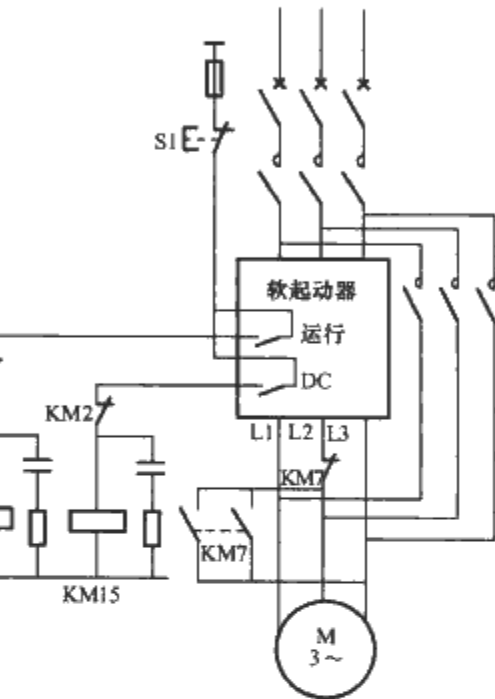


图 3.10-39 带制动的软启动

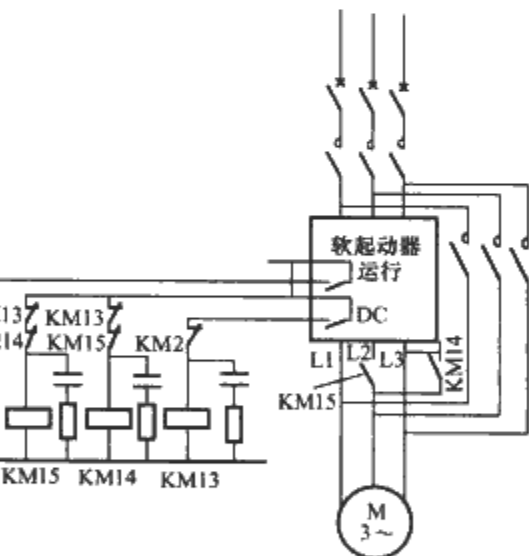


图 3.10-40 带制动的软启动

线路可看出，可利用交流软启动器的电力电子功率元件，改变其向电动机输送交流电能的通道，只允许脉冲直流通过 A 及 C 注入流向电动机定子绕组，并产生制动效果。在脉冲直流通过 A 及 C 相向定子输送直流电流时，B 相被 KM7 接触器断开，这样实际线路与图 3.10-39 的原理线路就一致了。由于转子电阻是固定的，通过调整注入直流的大小，可以调整制动转矩的大小。

对于图 3.10-40 所示的另一个线路是设置两只接触器 KM14 及 KM15，其中 KM14 称之为“关闭”制动接触器，KM15 称之为“打开”制动接触器。它们的作用与图 3.10-39 中 KM7 接触器相一致，只是此时用 KM15 代替了 KM7 的动合触点，KM14 代替了图 3.10-39 的动合触点。在控制

4.1.3 通过软启动器实现对电动机制动的控制

通过软启动器实现电动机从零到预定转速的启动过程，还可通过软启动器实现电动机从定转速到零速的制动。这种制动主电路图如图 3.10-36 所示，这是用一只制动接触器完成电动机制动工作的。图 3.10-37 所示为用二只制动接触器完成电动机制动工作。下面分别叙述它们的工作原理。图 3.10-38 所示为直流制动原理图，图 3.10-36 的制动原理就是依据图 3.10-38 而来。直流制动属于动能制动，由图 3.10-38 看出，对电动机来说，将直流电能接入电动机定子绕组后，它也会在电动机中产生磁场，它的基波值也会产生按正弦分布的磁通密度这时电动机转子仍然在旋转，在旋转着的转子中就感应到这种交流电流，但是这一交流电流产生的磁场相对定子而言是静止的，它不会对电动机起加速作用，反而由于这一交流电流的不旋转磁场与转子电流的相互作用对电动机产生减速作用力，产生制动转矩，达到电动机制动目的。

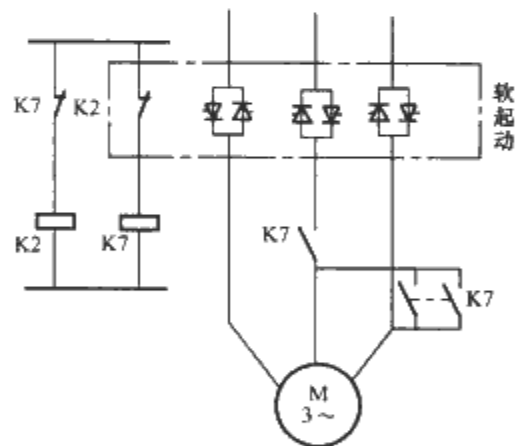


图 3.10-36 一只制动接触器制动

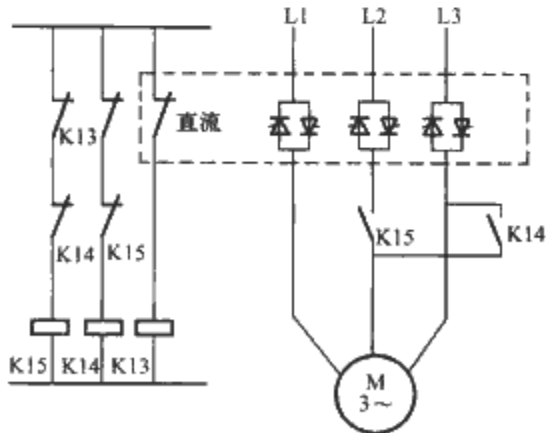


图 3.10-37 二只制动接触器制动

从直流制动原理，直流制动需外加一直流电源或通过外加一整流器将交流转换成制动需要的直流。通过图 3.10-39

方面无论是图 3.10-39 的 KM7 接触器和图 3.10-40 中的 KM14、KM15 接触器均受到中间继电器 KM2 和软起动器中予置的制动继电器控制。在容量选择上 KM14 的容量大些，要大到 15%。控制继电器 KM13 是带延时断开特性的开关。

4.1.4 带旁路接触器电路

带旁路接触器的软起动电路是软起动工业应用的主体，也即多数工业用户从经济技术、运行角度经过思考后的首选方案，如图 3.10-41 所示。

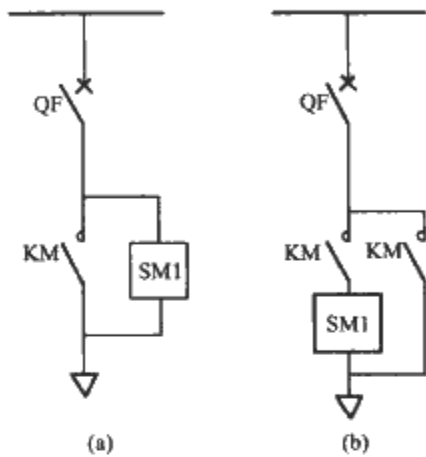


图 3.10-41 带旁路接触器方案
(a) 本地控制；(b) 远程控制

图 3.10-41 中有两种接线，图 3.10-41 (a) 所示为一起一本地控制方案，只设一台接触器 KM。但软起动上侧（网侧仍带电）。图 3.10-41 (b) 所示为一起一远程控制方案，设了两只接触器（KM1、KM2），KM1 与 KM2 之间互相联锁运行。这时当软起动转入旁路运行时，先将 KM1 打开，将 KM2 合闸，软起动器的网侧就不会带电。

4.1.5 带旁路接触器两个旋转方向运行电路

图 3.10-42 是一个带旁路接触器的两方向运行电路，其中 KM1 为正向运行接触器，KM2 为旁路运行接触器，KM3 为反方向运行接触器。利用 S3（正向合闸按钮）、S4（反向分闸按钮）操纵正向与反向运行，利用在软起动内部的逻辑信号，控制软起动完程后的旁路运行。其他的 S2 为停止按钮，S5 为紧急停止按钮。

4.1.6 软起动线路中保护协调与配合

4.1.6.1 软起动线路的过电流特性

表 3.10-6 软起动线路的过电流特性							
脱扣等级	最小过电流时间 t_x (s)						
	$x=8$	$x=7$	$x=6$	$x=5$	$x=4$	$x=3$	$x=2$
10	1.6	2	3	4	6	12	26
10	3	4	6	8	13	23	52
20	S	6	9	12	19	35	78
30	7	9	13	19	29	52	112

本规定仅为推荐性，且表示脱扣等级的最小脱扣时间的 x 和 t_x 相匹配，并应在产品标准中规定

软起动器由于起动、运行或操作引起的最大工作电流，称作过载电流（简称过电流）。通常根据 IEC 947—4.2 要求将过电流特性用表 3.10-6 表示，即用 t_x 与 x 表示的过电流特性。

表 3.10-6 中的 t_x 为过流时间， x 为过电流倍数。“10”、10 \times 表示脱扣等级。例如过电流倍数为 7 倍，选用脱扣等级 10 级配合；那过电流脱扣最小时间为 2s。这里的 t_x 表示的是起动、运行、操作时，控制过电流的持续时间累加值。当

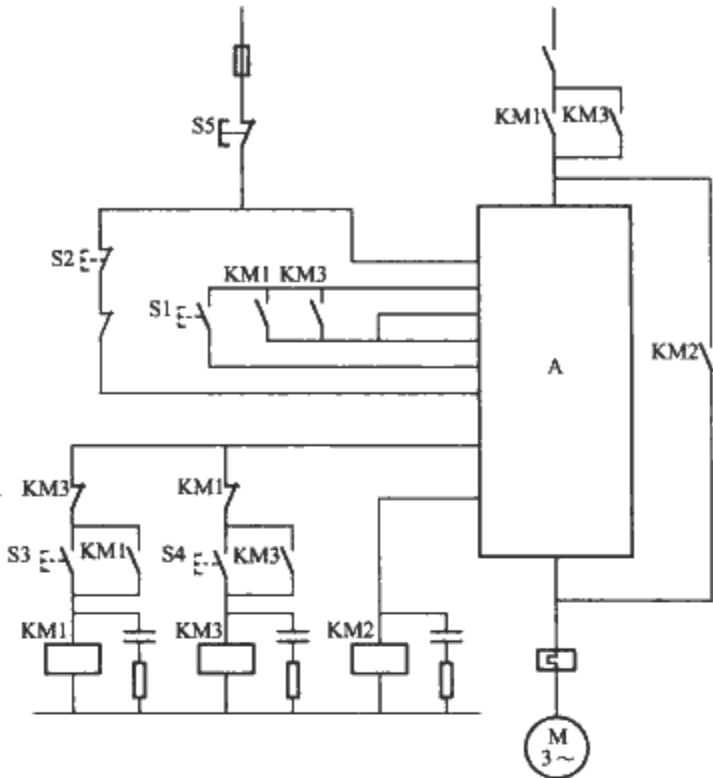


图 3.10-42 两个方向运转带旁路方案
KM1—主接触器；KM2—旁路接触器；KM3—反向运转接触器；S1—停止按钮；S3—合闸按钮；S4—合闸按钮；S5—报警复位；S2—关闭按钮
用其整定热过载电器时，其对应过载电器冷态下承载 xI_e （额定电流 x 倍）的最小时间。

如果过载时间万一超过 10 个循环电流（如提升，突跳起动）可能会超过 xI_e ，但这不是过载指定的范围，不在过载特性范围内考虑。

4.1.6.2 过载能力试验

在 IEC 947—4.2 操作性能要求中，要求做到软起动装置应能实现导通状态，变换电流承载预定水平的过电流，以及实现并保持在截止状态下的特性而无故障，并无任何形式的损坏。

对控制笼型电动机而无旁路运行时，其相应 x 值的 t_x 值不应小于表 3.10-6 规定的值。对控制笼型电动机而要旁路运行时，应满足这些作用类别所要求的长时间加速要求。考虑到起动状态时软起动的最大热容量会完全耗尽，为此在起动状态结束后应立即为软起动器提供适当的无载时间（例如采用并联方式）其相当于 x 值的 t_x 值不应小于表 3.10-6 规定值。

当无限流起动功能或在额定电压状态下无限流起动， $xI_N = I_{LRP}$ （ I_{LRP} 为电动机预期堵转电流）或 $x = I_{LRP}/I_N$ 。

当电动机已在正常转速下运转，而其转子出现堵转时，则允许起动器比上述规定更短时间实现截止状态。对额定值的验证根据 IEC 的要求，见表 3.10-7 中的规定。

表 3.10-7 试验电流参数					
使用类别	试验电流参数			操作循环导通时间 (s)	操作循环截止时间 (s)
	I_{LRP}/I_N	U_N/U_e	$\cos\varphi$		
不带旁路	4	1.1	0.65	t_x	<1440
带旁路	8		0.33		

表 3.10-7 中， I_{LRP} 为预期转子堵转电流， I_N 为额定电流， U_N 为额定电压， U_e 为工频恢复电压， $\cos\varphi$ 为功率因数。

温度条件：对每个试验不应低于 40℃ 加水温升试验时的最高柜体温升值，试验过程的周围空气温度应在 +10~

+40℃范围内。

(1) 除了导通时间的最后三个工频周期加上第一个导通时间外, U_N/U_c 可以为任意值。

(2) 对应减压周期时的 $\cos\varphi$ 中可以为任意值。

(3) 预定仅用于与规定的过载电器一起使用的起动器, T_x 应取为其过载电器在热态下, 所允许承受的最大动作时间, 热态是指进行温升试验时的热平衡状态。

(4) 转换时间应不大于三个工频周期。

4.2 交流软起动与多电动机主电路方案

4.2.1 多个电动机按序启动

有些工业负载要求采用一台软起动设备对设备中若干台电动机按序起动（见图 3.10-43），只要在控制及容量选择上稍加注意，是可以实现的。

如图 3.10-43 所示一台软起动器起动多台电动机在主回路接线方面是将软起动器阀侧（即电动机侧）分别引出若干个并联支线，然后分别通过接触器，再通过分别的热继电器（起过载保护作用），直到负载电动机的接线端子。若考虑到起动过后的旁路接触器分别与电网并接，还要单独设置其旁路接触器（如图 3.10-43 中的 KM2、KM3）。

一台软起动器按序起动多台电动机的容量选择可考虑两种情况：①多台电动机的容量相同，那么软起动器的容量按通常的方法计算即可；②多台电动机的容量不相同时，软起动器的容量估算要依据多台电动机中容量大的确定，并同时考虑多台电动机的分别起动间隔时间，这一间隔时间一定要与软起动说明书中的每小时起动次数一致。如果多台电动机的各台起动没有间隔时间，即连续按序起动软起动器，因每次起动引起的软起动器温升来不及冷却，会导致软起动器温升过高，报警装置动作，甚至将软起动器烧坏。在这种情况下建议将各台电动机的负载图都绘在一起，并作为一台电动机考虑，并求出它们的有效平均电流，然后根据这一有效平均电流去选择软起动器。

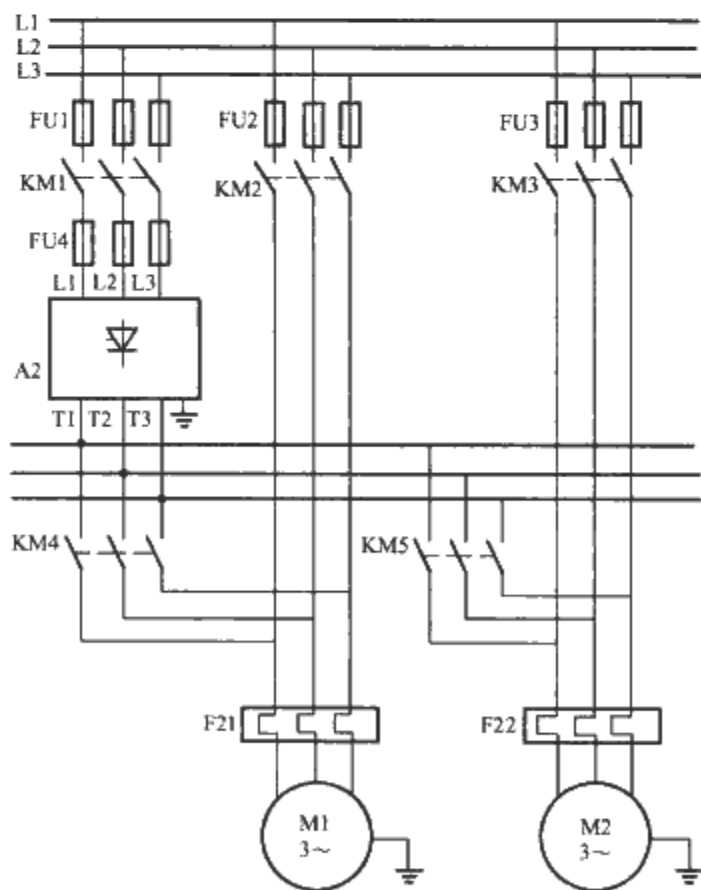


图 3.10-43 多台电动机按顺序启动

在软起动器的控制上对数字式软起动器来说,是完全可以实现,只是要根据不同电动机和(或)不同负载通过计算

机的程序做出不同设置，然后实施它。

对于变极电动机的起动，也可参考本节的叙述。

4.2.2 多台电动机的并联启动

多台电动机共用一台软起动器并联同时起动也是工业设备经常出现的一种情况。它的接线框图如图 3.10-44 所示。

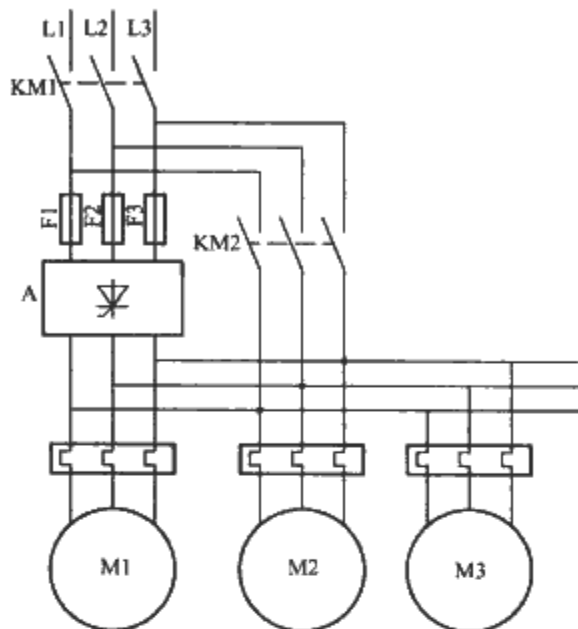


图 3.10-44 多电动机并联起动

图 3.10-44 中的多台电动机软起动主电路接线，是在软起动器的阀侧引出一公用母线，然后将多台电动机接在这公用母线上。

多台电动机共用一台软起动器起动时，其起动容量的估算必须是根据所有电动功率计算值之和。这时按软起动器工程整定值计算时，可依据近似的转矩—速度特性和近似转动惯量。

4.2.3 变极电动机软启动

图 3.10-45 提供了一种双速变极电机软起动方案,供读者参考。变极电动机为两速电动机,其中 KM5、KM6 为变极电动机切换接触器。

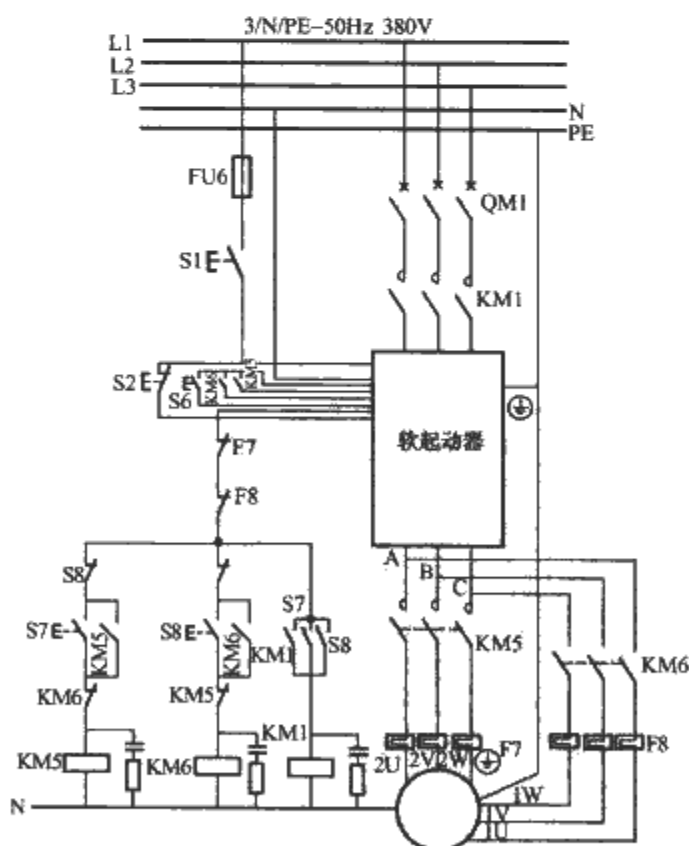


图 3.10-45 双极电动机软起动

FU6—控制电路熔断器；F7—过载继电器；F8—过载继电器；
KM1—主接触器；KM5—第一速度接触器；KM6—第二速度接
触器；S1—紧急停止；S2—关按钮；S7—第一速度标钮；S8—
第二速度标钮；S5—故障复位

4.2.4 电动机软起动与变频调速装置并联工作

有时用户需要软起动变频调速配合并联工作，图 3.10-46 介绍了一种方案简图供参考。KM1、KM2 分别为两种设备的网侧进线接触器，KM3、KM4 分别为两种设备网侧出线接触器，工作时各接触器之间要有联锁。

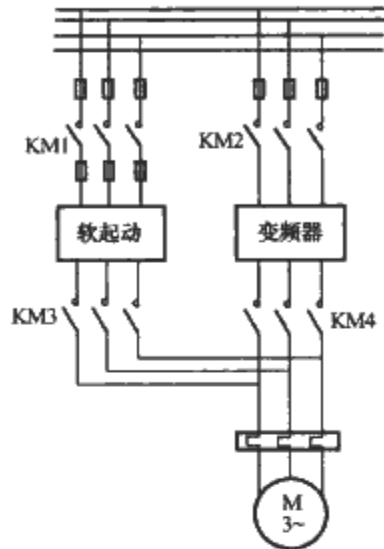
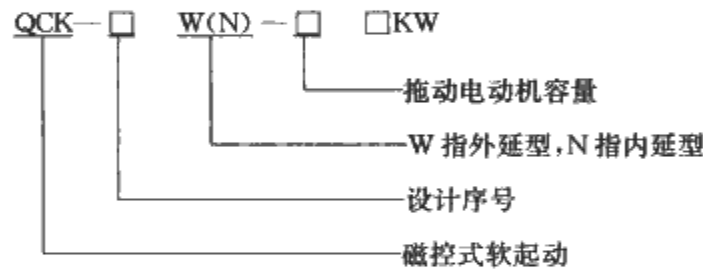


图 3.10-46 与变频器并联工作的软起动

5 磁控式软起动

QCK 型磁控式软起动产品型号表示如下：



磁控式软起动是利用可控饱和电抗器（磁放大器）原理，将饱和电抗器串接在供电电网与电动机之间，调节可控饱和电抗器的控制信号，使可控饱和电抗器完成磁控、限幅调压任务，实现调节电动机定子电压，控制电动机起动过程目的。由于可控饱和电抗器的输出压降随着控制信号可线性变化，从而电动机的定子电压也可随时间缓慢变化，实现电动机软起动。该产品具有结构简单，性能可靠，过载能力强，性价比适中等优点。由低压转换到全压是闭路转换，无二次电流冲击。比同样磁性器件控制的自耦变压器起动器价格相当，但可获得半导体控制软起动的性能，适用于 11~420kW 的三相异步电动机软起动控制。磁式软起动特性参数见表 3.10-8。

表 3.10-8 磁控式软起动特性参数	
项 目	内 容
特性参数	QCK
起动特性	软特性
起动电流	200A 以上
起动电流倍数	1.8~2.5 倍
起动方式	恒流软起动
起动时间	25s 可调
转换方式	闭路转换
执行元件	磁放大器
冲击电流	一次
适应负载	适于重载起动

使用条件如下：

- (1) 环境温度。环境温度不超过 40℃，24h 内平均温度不超过 35℃，最低环境温度 -5℃。
- (2) 相对湿度。在最高温度 40℃ 时，不超过 50%；在低温时允许有较高湿度，但不出现凝露。
- (3) 海拔。安装地点海拔不超过 2000m。
- (4) 空气污染。使用场合不得有爆炸危险和破坏绝缘的酸性气体和尘埃。
- (5) 安装倾斜度。必须与地面垂直安装，倾斜度不超过 5%。

6 晶闸管中压软起动

在工农业生产中使用中压电动机的起动方式基本是直接起动，这样的结果是造成电网电压的大幅度跌落，直接影响到同电网上其他用电设备的运行安全，严重的会造成设备损坏，甚至人身伤亡。随着电力电子技术的发展，使用高压大功率晶闸管完成的中压电动机起动设备——中压软起动装置得以发展并应用到实际中。

中压软起动和低压软起动其电路原理和控制原理都是一样的，故这里仅介绍中压软起动的特殊性。

6.1 晶闸管串联电路

中压软起动的功率变换部分，使用的仍然是普通晶闸管。国内普通晶闸管的制造水平已经达到了 6800A/2800V，3900A/6500V，2800A/8500V。这样高水平的晶闸管，在使用时考虑到安全系数，其承受的电压有效值也仅能达到 1000~3000V。欲再提高装置的电压等级，如 6000V、10000V 等就必须使用晶闸管串联技术来解决问题。晶闸管串联技术设计的功率电路（阀塔）如图 3.10-47 所示。

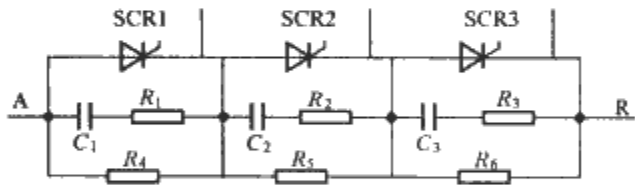


图 3.10-47 晶闸管串联功率电路原理图

图 3.10-47 中，SCR1~SCR3 为晶闸管元件；R₁~R₃ 和 C₁~C₃ 组成缓冲电路；R₄~R₆ 组成静态均压电路。

在进行晶闸管串联时，必须严格挑选管子的参数，使得串联起来的晶闸管不论是静态还是动态，其分压值都在设计的范围内。

由于晶闸管制造过程工艺控制的误差，造成元件参数的分散性。这些参数的非一致性，就使晶闸管的串并联使用显得很困难，这也是限制中压软起动发展的一个重要原因。

6.2 中压软起动装置

6.2.1 中压软起动装置的原理

中压软起动和低压软起动的区别除电压等级不同外，另一个重要差别就是低压软起动器可以作为元件使用（销售），再由系统集成商组成满足用户要求的装置；而中压软起动必须组成装置后销售，这主要是因为中压装置通常都是单机使用，自成体系的。

中压软起动装置由中压晶闸管功率电路、旁路接触器、触发电路、检测电路、中央控制单元（主控板）、操作单元配以开关电器、操作电路等构成，具有控制电动机起动、运行、停止及外部控制的全部功能，如图 3.10-48 所示。

图 3.10-48 中的配电断路器不属于软起动装置的部件，

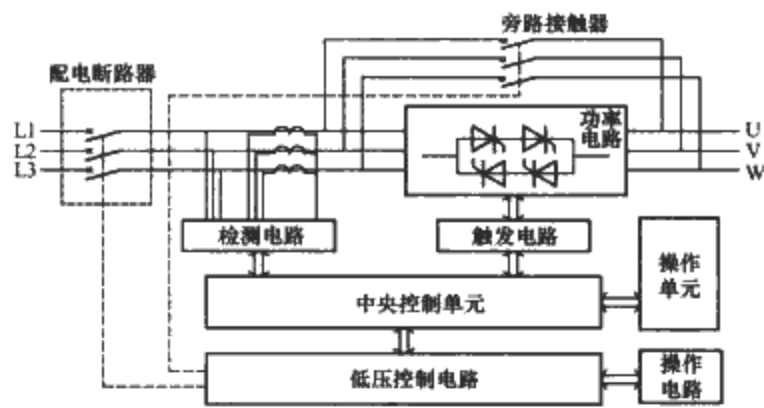


图 3.10-48 中压软起动装置框图

但软起动装置可以控制它的合、分操作，以完成保护功能。
当操作电路发出起动命令（也可以是接收来自 PLC、DCS、上位计算机等发出的自动控制命令），经低压控制电路进行隔离后，送到软起动中央控制单元，进而通过功率电路使软起动装置控制电动机按照预先设定的起动时间和电流限制值进行起动。电动机的起动过程完成后，软起动器向低压控制电路发出起动完成信号，低压控制电路发出旁路接触器闭合命令，电动机经旁路接触器接电网上全压运行。

在电动机起动和运行阶段，软起动器对运行状态和参数进行实时监测。

中压软起动的基本功能有：限电流软起动、电压斜坡软起动、脉冲起动功能、软停车、通信、故障保护、在线检测及保护、允许在低压（400V）状态下进行性能测试。

6.2.2 中压软起动装置的结构

中压软起动装置为金属柜式结构，所有元器件均安装在一个封闭的柜内。柜内至少要分割成两个独立的金属隔室，一个是中压室，另一个为低压室。所有中压主电路元器件（部件），包括晶闸管功率单元、旁路接触器等都安装在中压室里。在设备运行（主电路带电）时，中压室是不允许打开的，一旦打开门，其安全联锁机构会立即断开供电电源。

低压控制电器、中央控制单元、操作面板等低压部件均安装在低压室中。低压室在运行时允许打开，以便进行参数设定等调试操作。

6.3 中压软起动装置额定电压、额定电流等参数

6.3.1 中压软起动装置额定电压

中压软起动装置的额定电压应符合 GB 156—2003《标准电压》，该标准规定了适用于直流和 50Hz 交流的系统、电气设备和电子设备的额定电压（见表 3.10-9）。

表 3.10-9 3kV 以上电气设备的额定电压

受电设备与系统 额定电压 (kV)	供电设备额定 电压 (kV)	设备最高 电压 (kV)
3	3.15	3.5
6	6.3	6.9
10	10.5	11.5
	13.8*	
	15.75*	
	18*	
	20*	
35		40.5
63		69
110		126
220		252
330		363
500		550
750		

注 表中带“*”号的电压通常为发电机使用，空白表示无对应电压。

中压电动机的电压等级、中压软起动装置的电压等级是

与表 3.10-12 对应的，即 3、6kV 和 10kV。

另外，许多进口设备或按国外标准生产的设备，使用的是 IEC60038 中规定的电压等级（kV），因此，3.3、4.16、6.6、11、12.47、13.2、13.8、15 这些电压等级也是可以使用的。

6.3.2 中压软起动装置额定电流

中压软起动装置的额定电流应符合 GB/T 762—2002《额定电流》规定，见表 3.10-10。

表 3.10-10 电气设备的额定电流 A

1	1.25	1.6	2	2.5	3.15
10	12.5	16	20	25	31.5
100	125	160	200	250	315
1000	1250	1600	2000	2500	3150
10 000	12 500	16 000	20 000	25 000	31 500
100 000	125 000	160 000	200 000		

由于中压软起动装置是由电力电子元件为核心的，因此允许生产厂商依照晶闸管的电流等级确定装置的额定电流。

6.3.3 中压软起动装置的其他参数

额定频率：50/60Hz。
起动电流倍数：标准软起动装置（器）的起动电流倍数是按电动机额定电流的 4 倍设计的，特殊要求时，可以设计成 3 倍、5 倍等，这要与制造商协商确定。

起动（停止）时间：该时间的标准设计一般为 0~30s，最长不超过 60s。当要求的起动（停止）时间超出所选型号的最大可调时间时，要与生产厂商协商。

控制电源：标准产品的控制电源都设计成 AC220V 和 DC220V 可选型。根据用户要求，也可设计成其他等级的控制电源。

6.4 中压软起动装置的应用电路

简单地讲，低压软起动器的应用电路对中压软起动装置仍然适用，但也有其特殊的地方，这主要表现在配电部分上。

6.4.1 网侧接触器

从图 3.10-35 和图 3.10-36 可见，图 3.10-48 比图 3.10-34 或图 3.10-35 少设置一台接触器，这是因为低压产品是多台装置并接在一个公共母线上，除需要用没有控制功能的断路器或刀熔开关来进行保护外，还需要对软起动器进行通/断电控制，因此必须设置网侧接触器。

而中压系统，一般都是一台配电断路器对应一台装置，而中压配电断路器除具有保护功能外，还具有供电控制功能，即同时具有低压断路器和接触器的功能，所以中压系统可以不配置网侧接触器。另外，中压配电断路器是具有过热保护功能的，因此热继电器也是不需要的。

6.4.2 线路控制

这种方式就是将软起动装置配置到电动机定子与电源间，不论电动机绕组接成星形还是三角形均可以，是应用最广的一种方式，如图 3.10-49 所示。本方式，软起动装置的相单元承受的是电动机的线电流、相电压。

6.4.3 星点控制

星点控制就是将软起动装置配置到电动机的星点处，电动机等效于星接，如图 3.10-50 所示。采用星点控制时，要求电动机绕组的首尾 6 个头都要引出来。

图 3.10-50 所示两种电路均可以使用，但由于软起动装



图 3.10-49 软起动装置接于电源与电动机定子间的相单元联结方式不同，使其承受的是电压、电流也不同。

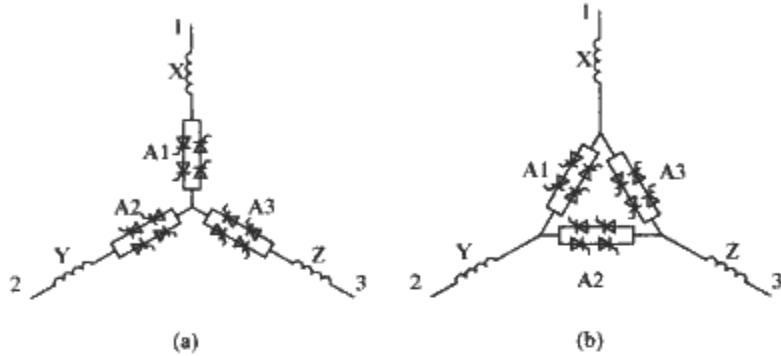


图 3.10-50 软起动装置在电动机尾端星接

6.4.4 共三角形的支路控制

与电动机定子绕组串联的方式，电动机等效于角接，如图 3.10-51 所示。电动机绕组承受的是相电流、线电压，软起动装置的相单元也承受相电流、线电压。采用本方式，要求电动机绕组的 6 个头都要引出来。

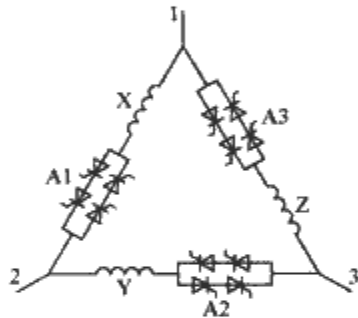


图 3.10-51 软起动装置与电动机定子绕组串联的共三角形接法

6.4.5 应用于多电动机系统

所谓多电动机系统，实际就是使用一台中压软起动装置依次起动多台电动机的系统配置方案，如图 3.10-52 所示。图 3.10-52 是一个使用一台中压软起动装置依次起动 5 台电动机的系统简图，图中 QF0 是软起动装置供电的配电开关，QF1~QF5 是电动机 M1~M5 起动完成后全速运行时的配电开关，KM12、KM22、KM32、KM42、KM52 是电动机软起动时的选择接触器，KM11、KM21、KM31、KM41、KM51 是电动机起动完成后全速运行时的运行接触器。当规程允许 QF1~QF5 投切电动机时，KM11、KM21、KM31、KM41、KM51 可以取消，否则要设置。

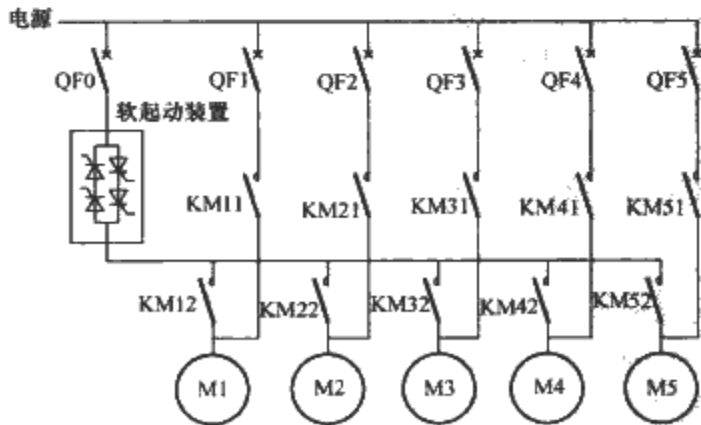


图 3.10-52 多电动机系统

在使用多电动机方案时，软起动装置是不需要配置旁路接

触器的，电动机的全速运行是通过运行接触器完成的。注意的是要设计好各接触器之间的联锁，特别是 KM12、KM22、KM32、KM42、KM52 不允许有两个或以上同时闭合。

6.4.6 与变频器组成混合系统

混合系统就是使用一台中压软起动装置依次起动多台不需要调速的电动机，再使用一台中压变频器对一台或几台进行调速的系统配置方案，如图 3.10-53 所示。图 3.10-53 是一个使用一台中压软起动装置依次起动 3 台电动机，一台中压变频器对两台电动机进行调速的系统简图，图中，QF0 是软起动装置供电的配电开关，QF1~QF3 是电动机 M1~M3 起动完成后全速运行时的配电开关，KM12、KM22、KM32 是电动机软起动时的选择接触器，KM11、KM21、KM31 是电动机起动完成后全速运行时的运行接触器，QF5 是变频器的供电配电开关，KM42 和 KM52 是电动机 M4 和 M5 的选择开关。M4 和 M5 是一用一备的。

该方案中，软起动装置同样不需要配置旁路接触器。

注意的是要设计好各接触器之间的联锁，特别是 KM12、KM22、KM32、KM42 和 KM52 不允许有两个或以上同时闭合。

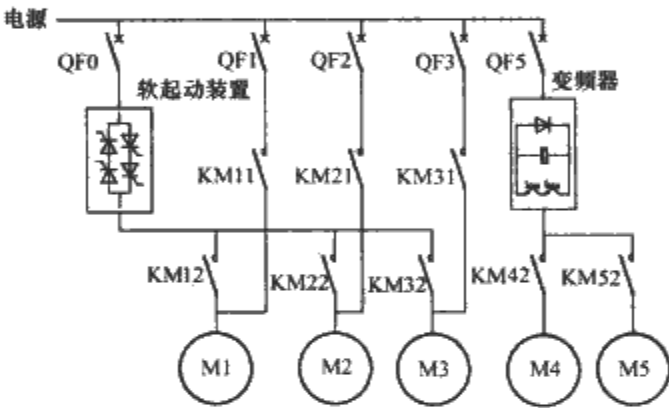


图 3.10-53 与变频器组成的混合系统

6.4.7 中压软起动与无功功率补偿装置的配合使用

在配电系统中，经常使用无功功率补偿装置来解决系统功率因数低的问题。在使用了无功补偿装置的情况下，中压软起动装置应如何配置？图 3.10-54 (a) 给出了正确的配合系统图。图 3.10-54 (b) 是错误的，其原因是在于：在电动机还没有停下来时分断了断路器 QF1，补偿电容就会给电动机提供超前的无功电流，使电动机变成发电机。而且，电动机是空载发电，发出的电还没有消耗的通路，形成了很高的空载电压（该电压与电容提供的电流大小、电动机的转速有关），该电压会损坏软起动装置，特别是大惯性负载更加危险。若在断开 QF1 后很快去接触软起动装置，将造成严重的人身伤害事故。图 3.10-54 (c) 是可以使用的，但必须保证在断开 QF1 前先断开 KM2，因此不建议采用。

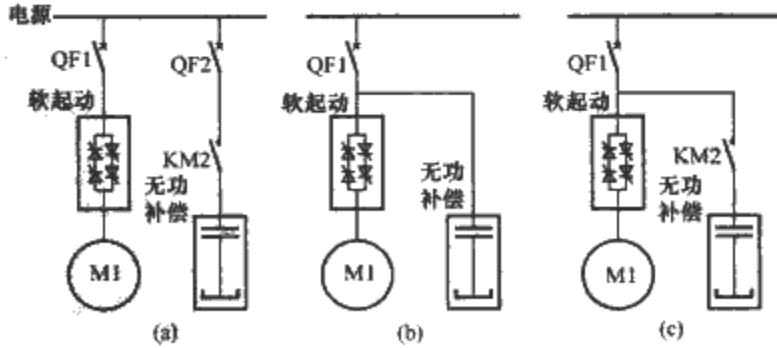


图 3.10-54 与无功补偿装置的配合 (a)、(b) 错误配合；(c) 有条件使用

6.4.8 中压软起动装置使用中需要注意的问题

晶闸管软起动装置在停止工作期间，如果主电路的供电

电源没有断开,经RC电路耦合,电动机上依然带电,会对人体造成一定的伤害。故在接触电动机等之前,一定要断开整个电动机系统的供电电源。

装置的送电步骤:开机时先接通控制电源,再接通主电源,然后给出运行命令;关机时先给出停止命令,待装置处于停止状态后,再断开主电源,最后断开控制电源。

建议每6个月对装置进行一次全面检查,其主要工作是清除灰尘和紧固螺钉。注意:在接触控制板前,一定要将手上的静电放掉,以免击穿电子元件。

6.5 中压软起动装置选型计算

中压软起动装置,一般情况下用在风机或水泵的起动上。下面以风机水泵的使用为例讨论中压软起动装置的选型计算。

6.5.1 基本选择计算

通常情况下,只能从电动机铭牌上知道电动机常规数据:额定功率、额定电压、额定电流、额定频率、额定转速、功率因数。

首先,装置的额定电压要和电动机的额定电压相匹配,绝不允许使用低电压等级的装置去驱动高电压等级的电动机,如6kV的电动机一定要选择不低于6kV的装置。

根据电动机的额定电流,向上靠挡选择装置的额定电流,如电动机的额定电流是180A,可以选择额定电流200A的装置。

在有些场合下,如设计初期,用户只能给出电动机的功率而无法提供电动机的额定电流,这种情况下,可以通过下式进行简单计算后进行选择。

$$I = \frac{P_e}{(0.8 \sim 0.9) \sqrt{3} U_N} \quad (3.10-31)$$

系数0.8~0.9是效率 η 和功率因数 $\cos\varphi$ 的近似乘值。在电动机参数不全的情况下,该系数取值越小,安全系数越大。

例如,6kV,1600kW电动机,经简单计算其电流约为171~192A,可以初步选择额定电流为200A的装置。特殊情况下,也可以选择软起动器的额定电流小于电动机的额定电流,但不做常规设计使用,这里不做详解。

6.5.2 选择计算的修正

式(3.10-31)的选择计算结果适用于软起动装置在标准设计情况下运行,即起动电流倍数和起动时间都在设计标准范围内。对于短时工作制的中压软起动装置来讲,如果实际起动电流倍数高于装置的设计标准倍数、实际起动时间大于设计时间时,要由设备厂家对设备进行核算后确定选型。对于海拔超过1000m或环境温度超过40℃的场合,还要进行降容核算。不同厂家的产品,不同的设计,降容系数是不同的,在制造商没有给出降容系数时,可参照图3.10-55和图3.10-56进行降容估算。

从图3.10-55中可以看到,在海拔超过1000m时,装置

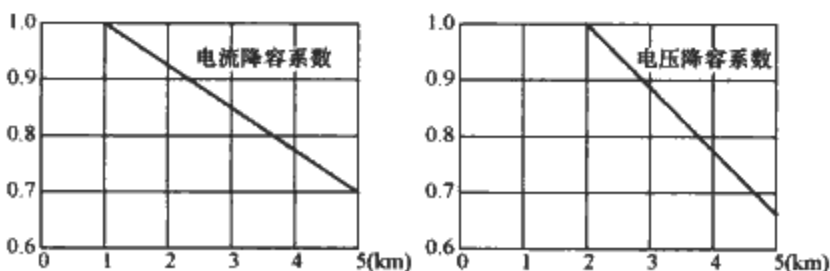


图 3.10-55 海拔降容系数

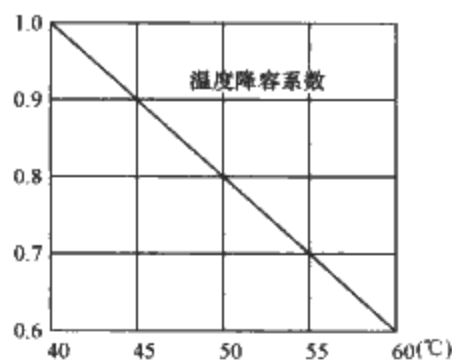


图 3.10-56 温度降容系数

的电流就要降容使用;海拔超过2000m时,在装置电流降容的同时,装置的电压也要降容。图3.10-56表示的是在环境温度超过40℃时,装置的降容系数。例,在海拔1500m的地方,电压不需降容,电流降容系数约为0.95。一台250A的装置,在这个高度时允许的使用电流 $I=250 \times 0.95=237.5A$ 。若在海拔3000m的地方,电流降容系数约为0.84,电压降容系数为0.9。一台6000V/250A的中压软起动装置,在这个高度时允许的使用电流 $I=250 \times 0.84A=210A$,而允许的使用电压是 $U=6000 \times 0.9V=5400V$ 。因此,要在海拔3000m的地方起动一台额定电压6kV,额定电流235A电动机,必须选择额定电流为315A,额定电压6.6kV的装置。

6.5.3 电网压降的核算

使用中压软起动装置的目的是减少电动机起动时起动电流造成的电网电压跌落,因此对起动时电网电压跌落的幅度进行计算是十分必要的。图3.10-57所示为常见中压电动机配电系统简图,电动机经电缆L接到配电母线上。

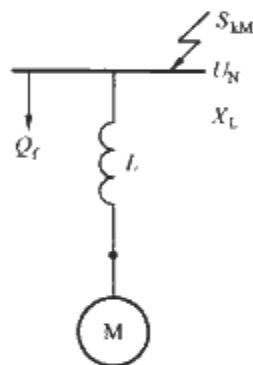


图 3.10-57 电动机配电系统简图

设电动机功率 P (kW),额定电压 U_N (V),起动电流倍数为 K_i ,功率因数 $\cos\varphi$ 。

按 K_i 倍起动电流起动时需要的起动容量 S_M 为

$$S_M = \frac{K_i P}{\cos\varphi} \frac{1}{1000} \quad (\text{MVA}) \quad (3.10-32)$$

设电缆的截面积为 S_L (mm²),长度 L (km),考虑电阻的铜电缆阻抗 X_L 为

$$X_L = (0.07 + \frac{6.3}{S_L}) L \quad (\Omega) \quad (3.10-33)$$

起动时起动回路的输入容量 S_I 为

$$S_I = \frac{1}{\frac{1}{S_M} + \frac{X_L}{U_N^2}} \quad (\text{MVA}) \quad (3.10-34)$$

如果电网最小短路容量为 S_{kmin} (MVA),母线上的预接负载为 Q_f (Mvar),则供电母线电压相对值 U_x 为

$$U_x = \frac{S_{kmin} + Q_f}{S_{kmin} + Q_f + S_I} \times 100\% \quad (3.10-35)$$

电动机端子上的电压相对值 U_{x0} 为

$$U_{x0} = U_x \frac{S_I}{S_M} \times 100\% \quad (3.10-36)$$

电动机起动时造成的电网母线电压相对值不能低于85%。特殊情况下可到80%。电动机端的电压相对值不能低于电动机需要的最小起动电压。

电动机起动需要的最小起动电压相对值 U_{xM} 由下式确定

$$U_{xM} = \sqrt{\frac{1.1 T}{K_M}} \times 100\% \quad (3.10-37)$$

式中： T_j 为系统静阻转矩倍数； K_M 为电动机起动转矩倍数。

6.5.4 中压软起动装置应用计算实例

有一个风机系统，电动机额定电压 U_N 为 6kV，额定功率 P 为 2000kW，起动电流倍数 K_i 为 7，起动转矩倍数 K_M 为 0.85，功率因数 $\cos\varphi$ 为 0.87，风机等折合到电动机轴上的静阻转矩 T_j 为 0.25，供电电缆长 L 为 300m，电缆截面 S_L 为 240mm²，电网最小短路容量 S_{kmin} 为 50MVA，预接负载 Q_f 为 2Mvar。系统如图 3.4-57 所示。

电动机额定电流为

$$I = \left(\frac{2000}{6 \times 0.87 \times 0.95 \times \sqrt{3}} \right) A = 233A$$

全压起动时：

电动机起动时需要的起动容量为

$$S_M = \left(\frac{7 \times 2000}{0.87} \times \frac{1}{1000} \right) MVA = 16.09MVA$$

考虑电阻的电缆阻抗为

$$X_L = \left[\left(0.07 + \frac{6.3}{240} \right) \times 0.3 \right] \Omega = 0.0289\Omega$$

起动时的输入容量为

$$S_1 = \left[\frac{1}{\frac{1}{16.09} + \frac{0.0289}{6^2}} \right] MVA = 15.88MVA$$

母线电压相对值为

$$U_x = \frac{50 + 2}{50 + 2 + 15.88} \times 100\% = 76.6\%$$

电动机端电压为

$$U_{x0} = 76.6 \times \frac{15.88}{16.09} = 75.6\%$$

电动机起动最低端电压为

$$U_{xM} = \sqrt{\frac{1.1 \times 0.25}{0.85}} \times 100\% = 56.9\%$$

电动机可以正常起动，但母线电压下降到 80% 以下了，严重影响到系统中其他电气设备的运行安全。

使用软起动，限制 4 倍起动电流时的母线压降时：

电动机起动时需要的起动容量为

$$S_M = \frac{4 \times 2000}{0.87} \times \frac{1}{1000} (MVA) = 9.20MVA$$

起动时的输入容量为

$$S_1 = \frac{1}{\frac{1}{9.20} + \frac{0.0289}{6^2}} = 9.13MVA$$

母线电压相对值为

$$U_x = \frac{50 + 2}{50 + 2 + 9.13} \times 100\% = 85.1\%$$

电动机端电压为

$$U_{x0} = 85.1 \times \frac{9.13}{9.20} = 84.5\%$$

电动机可以正常起动，母线电压也满足标准要求，系统运行是安全的。

6.5.5 电动机起动过程的详细计算

如果需要对整个起动过程进行起动时间、起动电流倍数、电网压降等的详细计算，除了要知道电动机的铭牌数据额定功率、额定电压、额定电流、额定频率、额定转速、功率因数外，还要知道电动机的速度—电流曲线或起动电流倍数、转矩—速度曲线或起动转矩倍数、最大转矩倍数、电动机转子转动惯量、额定速度下的负载转动惯量、负载转矩—转速曲线等详细数据。通常情况下，采用基本选择计算

完全可以满足工程需要，故对详细计算不做细解。

6.6 典型中压软起动装置简介

NBRS 和 HRVS-DN 系列中压软起动装置，电压为 2.3~15kV，电流为 60~1200A (1500A)。其控制核心采用第三代微处理器，速度快、精度高。全数字设计，各种参数和设置均可以通过面板操作来完成。友好的操作界面，有中文、英文、法文、德文、西班牙文四种语言可选，适合国内外各类用户使用；操作面板上的 LED 灯，明显地指示出当前的工作状态；电子式电压互感器，隔离程度高；控制方式多样，使用灵活；装置可以在低压 (AC380V) 条件下进行测试；可以在主电路不送电的情况下进行晶闸管触发、继电器、指示灯测试；独特的个体晶闸管故障指示；可以使用一台装置逐次起动多台电动机；可以起动同步电动机；多功能的可编程输入/输出接口和可选的 0/4~20mA，0~10V 模拟量输出，方便用户使用；可选的多种通信接口和协议，方便用户组网；45~65Hz 的频率自动跟踪，适应发动机供电的频率变化场合；完善的电动机保护包，时刻监视着电动机及系统的运行状态；由八位 DIP 开关进行工作模式选择。

控制功能：限电流起动功能、电压斜坡起动、电流斜坡起动、转矩斜坡起动、泵控功能、双调节功能（一台软起动器起动两台起停特性不同的电动机或双速电动机）、脉冲起动功能、软停止功能、速度反馈（使用码盘，可选）、起动同步电动机。

保护功能：可保护起动次数太多、起动超时、过载、过电流、欠电流、电流不平衡、软起动器超温、接地故障电流、缺相、倒相、欠电压、晶闸管短路和连接错误、旁路打开、2 个外部故障。

产品型号 NBRS-06200-S1 和 HRVS-DN200-4160，型号说明如下，技术数据见表 3.10-11。

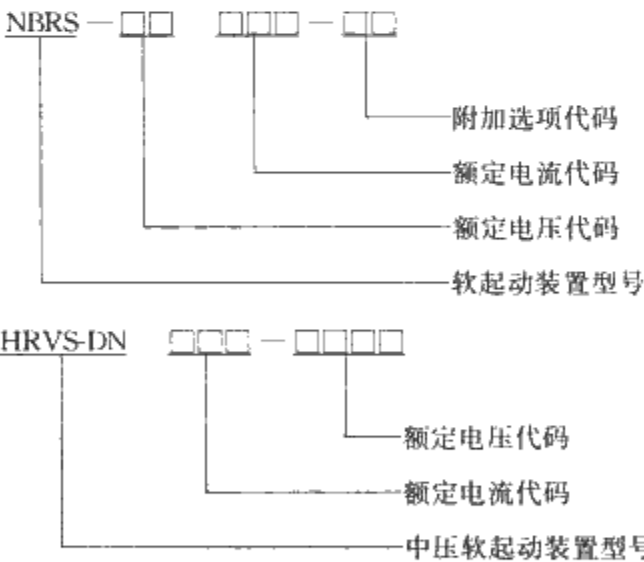


表 3.10-11 NBRS 及 HRVS-DN 中压软起动装置技术数据	
项 目	内 容
功率组件	晶闸管
变换器电路图	符合 IEC 146 的三相交流电压控制器
控制器	全数字 32 位处理器
系统电压	2.3kV、3.3kV、4.16kV、6.0kV、6.6kV、11kV 和 13.8kV
系统频率	50/60Hz，±3%
系统电压公差	+10%，-15%

续表		
项 目		内 容
辅助电源（控制电压） 35VA 运行时，350VA 启动时		单相，110V，AC，50/60Hz 单相，220~240V，AC，50/60Hz 直流电源：110V
显示器		16 字符×2 行，有中文、英文、法文、德文、西班牙文可选
电源部分与控制信号和 反馈信号之间电气隔离		光纤
防护等级	标准	IP32
	可选	IP54
冷却方法		自然空冷/ 强制空冷
符合标准		IEC，EN，NEMA，CSA，IEEE
喷涂		RAL 7032

表 3. 10-12 为 NBRS 系列和 HRVS-DN 系列软起动的运行条件。

表 3. 10-12 NBRS 和 HRVS-DN 软起动的运行条件		
项 目		内 容
最大启动电流		电动机满载电流（FLA）的 400％
最大启动时间		30s，400％FLA 时
最大启动次数		启动 4 次（最大条件时，40℃，30s，400％IR）
环境温度	运行时	0~+40℃，最大 60℃。40℃以上，每 5℃降容 10％
	运输时	(-10~50)℃
	储存时	(-25~70)℃
安装高度		最高为海平面以上 1000m，如果超过 1000m，起动器需降容运行
最大相对湿度		95％，无冷凝

第 11 章 无功功率补偿装置

1 无功功率补偿装置

1.1 概述

1.1.1 无功功率补偿

在实际生产生活中用电设备多为感性负荷，需要大量的无功功率，如从电网中索取这部分无功，将会带来电网功率因数的下降，引起电流相位滞后于电压（见图 3.11-1）。由于无功电流的流动，增加了输电线路和变压器附加损耗，并使电网电能质量恶化，降低电能利用效率和经济效益，因此设计输、配电系统的传输能力时，就要考虑无功功率对电网的影响。除从电网中索取无功功率外，另一条供给无功功率的途径就是设置补偿电容器。这种补偿方案的物理含义，可用图 3.11-2 说明。

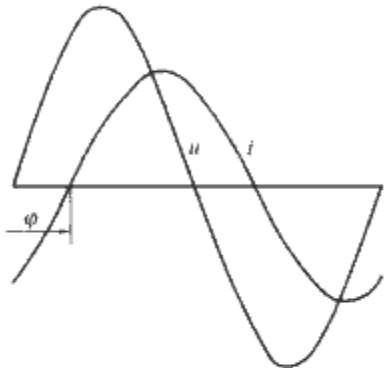


图 3.11-1 感性电路图

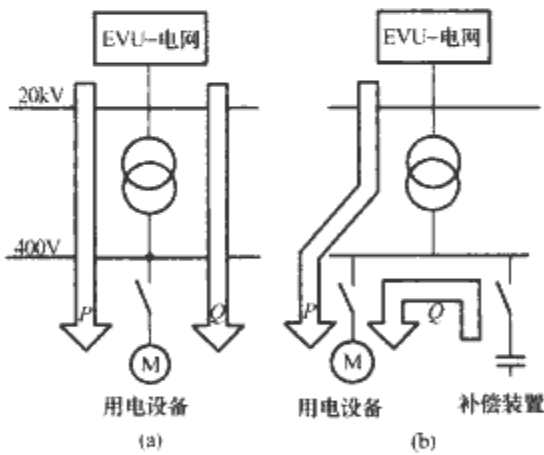


图 3.11-2 低压电网中功率流动
(a) 补偿前电网；(b) 补偿后电网

1.1.2 无功功率补偿的作用

- (1) 提高用电系统及负载的功率因数，降低设备容量减少功率损耗。
- (2) 稳定受电端及电网的电压，提高供电质量，在长距离输电系统中合适的地点设置动态无功功率补偿装置还可以改善输电系统的稳定性提高输电能力。
- (3) 在三相负载不平衡的场合通过适当的无功补偿可以平衡三相的有功及无功负载。
- (4) 节约能源、减少资源消耗。

1.1.3 无功功率补偿与电容器

1.1.3.1 电容器容量

(1) 单相电容器。下列公式适用于单相电容器：

$$Q_c = U^2 \omega C \times 10^{-3}$$

$$I_c = \frac{Q_c}{U}$$

$$X_c = \frac{U \times 10^3}{I_c}$$

(2) 三相电容器。

1) 下列公式适用于 Y 接法的三相电容器

$$Q_c = U^2 \omega C_Y \times 10^{-3}$$

$$I_c = \frac{Q_c}{\sqrt{3}U}$$

$$X_c = \frac{U \times 10^3}{\sqrt{3}I_c}$$

2) 下列公式适用于 Δ 角接法的三相电容器

$$Q_c = 3U^2 \omega C_{\Delta} \times 10^{-3}$$

$$I_c = \frac{Q_c}{\sqrt{3}U}$$

$$X_c = \frac{\sqrt{3}U \times 10^3}{I_c}$$

以上计算 Q 的公式，当 Q 相同时，可得式 $C = C_Y = 3C_{\Delta}$ ，即为了得到相同的无功功率，Δ 接法的电容器值仅为 Y 接法的电容器 C_Y 的 1/3。

1.1.3.2 电容器功率的确定

无功功率补偿设计时需要考虑，用电同期系数（见表 3.11-1）、负荷系数 q 和实际出现的有功功率值及功率因数，将各个用电设备需要的无功功率相加，为设计时的近似值。例如， $Q_c = 0.3qS$ ，其中 0.3 为经验系数，q 为同期系数。这一经验公式的依据是将用电设备的平均功率因数定为 $\cos\varphi_1 = 0.75$ ，用电容器补偿后，得到改善的功率因数定为 $\cos\varphi_2 = 0.9$ 。

表 3.11-1 用电同期系数参考值

用电设备类型	办公大楼	医 院	商 店
照明设备	0.85~0.98	0.7~0.9	0.85~0.95
空调设备	1	0.9~1	0.9~1
厨房设备	0.5~0.85	0.6~0.8	0.6~0.8
直升电梯/自动扶梯	0.7~1	0.5~1	0.7~1
插 座	0.1~0.15	0.1~0.2	0.2

无功功率补偿基本公式为

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\tan\varphi = \frac{P}{Q}$$

$$I = \sqrt{I_P^2 + I_Q^2}$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

式中：S 为视在功率，kVA；P 为有功功率，kW；Q 为无功功率，kvar； I_P 为有功电流，A； I_Q 为无功电流，A。

确定补偿功率的公式为

$$Q = \alpha P (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (3.11-1)$$

式中：α 为平均月负载率，一般在 0.7~0.8 之间选择；Q 为补偿容量；P 为被补偿系统计算负荷（有功功率）； φ_1 为补

偿前的功率因数角，取负载中最大值； φ_2 为补偿后的功率因数角，按电力部门规定值选择。

1.2 公用电网对无功功率及功率因数的要求

国家对公用电网无功功率及功率因数的要求的规定：无功电力应就地平衡。用户应在提高用电自然功率因数基础上，按有关标准设计和安装无功功率补偿设备，并做到随其负荷、电压变动及时投入或切除，防止无功电力倒送。除电网有特殊要求的用户外，用户在当地供电部门规定的电网高峰负载时的功率因数应达到下列规定：

- (1) 100kV 及以上高压供电的用户功率因数为 0.9。
- (2) 其他电力用户和大中型电力排灌站、供电企业，功率因数为 0.85 以上。
- (3) 农业用电功率因数为 0.8。

凡功率因数达不到上述规定的用户，供电部门可拒绝供电。对已送电的用户，供电部门应督促和帮助用户采取措施提高功率因数。对在规定期限内，仍没采取措施达到上述要求的用户，供电部门可终止或限制供电。

实际上各地供电公司还采取了不同时段供电价格和不同功率因数的电费计价办法，以鼓励用户在非高峰负荷用电及维持较高功率因数。

1.3 无功功率补偿装置的分类

1.3.1 补偿装置分类

- (1) 按安装的部位分（见图 3.11-3）。
 - 1) 集中补偿。将低压成套无功功率补偿装置安装在变电所对无功功率进行集中补偿的装置。
 - 2) 分组补偿。将低压成套无功功率补偿装置安装在功率因数较低的用电单元或母线上对供配电系统中的一部分（区域）无功功率进行分段（区域）补偿的装置。
 - 3) 末端补偿。将低压成套无功功率补偿装置直接安装在感性用电设备附近对无功功率进行补偿的装置。
- (2) 按补偿相数分。
 - 1) 分相补偿。
 - 2) 三相补偿。
 - 3) 混合补偿（单相、三相混合补偿）。
- (3) 按有无抑制谐波或滤波功能分。
 - 1) 无抑制谐波或滤波功能。
 - 2) 有抑制谐波功能。装置投入运行不能使系统谐波含量增加。
 - 3) 有滤波功能。装置投入运行使系统谐波含量减少。

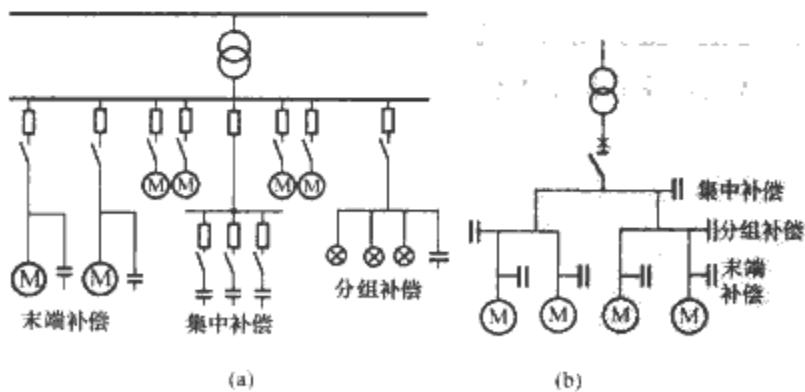


图 3.11-3 无功补偿方式

(a) 不同分支布置；(b) 不同层次布置

(4) 无源补偿及有源补偿。

1.3.2 末端补偿

对电动机侧直接进行补偿的实例图如图 3.11-4 所示。

对交流电动机侧单独补偿，也称末端（就地）补偿。在末端补偿时，电容器直接在电动机定子侧，并与用电设备一起通过一个共用的开关电器接通。对那些容量较大的电动机，应用末端补偿是值得推荐的。

末端补偿的实用线路及元器件选择：由于电动机单独供电运行，就必须有独立的控制启动—停止的起动箱（柜）。所以实用单独补偿线路就与电动机起动设备安装在—起，有时也称带补偿起动设备。

1.3.2.1 末端补偿的线路

带补偿的笼型异步电动机直接起动，带补偿的笼型电动机 Y— Δ 起动，带补偿的笼型异步电动机自藕减压起动和带补偿的绕线转子异步电动机起动，如图 3.11-5~图 3.11-8 所示。

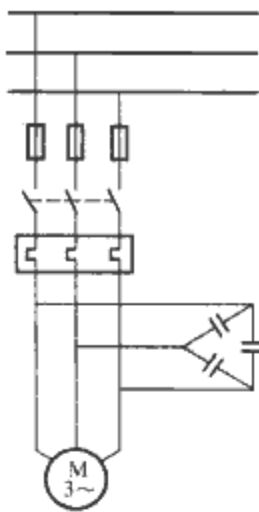


图 3.11-4 在电动机侧直接补偿原理图

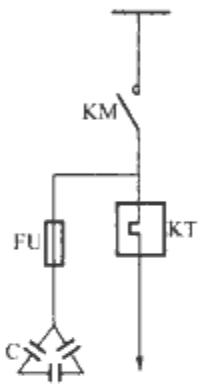


图 3.11-5 带补偿的笼型异步电动机直接起动

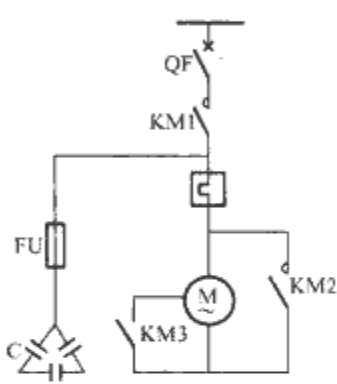


图 3.11-6 带补偿的笼型异步电动机 Y— Δ 起动

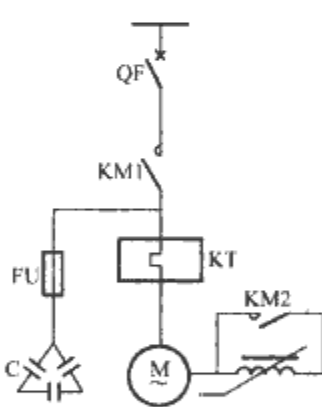


图 3.11-7 带补偿的笼型异步电动机自藕减压起动

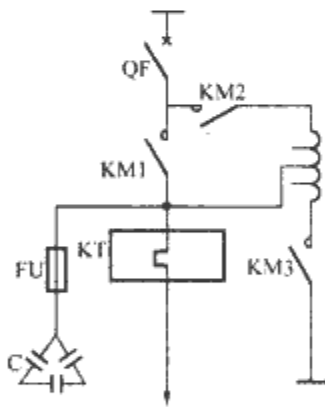


图 3.11-8 带补偿的绕线转子异步电动机起动

1.3.2.2 电动机单独补偿电容量的确定

下面提供几种以异步电动机为主的感性负荷进行就地单独补偿的计算方法。

(1) 按异步电动机空载电流 I_0 确定单独补偿电容量。

$$Q_C = \sqrt{3}U_N I_0 \quad (3.11-2)$$

式中： U_N 为电动机额定电压，kV； I_0 为电动机空载电流，A。

I_0 可按式计算，取其较小的：

$$I_0 = 2I_N (1 - \cos\varphi_N) \quad (3.11-3)$$

$$I_0 = I_N \left(\cos\varphi_N - \frac{\cos\varphi_N}{2b} \right) \quad (3.11-4)$$

式中： I_N 为电动机额定电流，A； $\cos\varphi_N$ 为电动机额定功率因数，可从电动机样本查出； b 为最大转矩/额定转矩，可取 1.8~2.2，也可由电动机样本中查得。

而电动机空载电流一般在 (23%~40%) I_N (电动机额定电流) 之间。从运行看, 可保证电机在额定电压下断电时, 电容器对电动机的放电电流不会超过电机空载电流而引起自激, 至使电动机转入发电运行状态。但上述公式都是技术理想情况, 对电动机运行中的参数变化 (特别是励磁电流是非独立系统) 缺少必要的修正, 因此未免会发生偏差。

(2) 按末端电压抬高值 ΔU 确定补偿容量

$$\Delta U = U_N \frac{Q_c}{A} \tag{3.11-5}$$

式中: A 为电容装置每相感抗与容抗之比, 认为 X_L/X_C ; Q_c 为接入电容器总容量, kvar; ΔU 稳态电压增高值, V。

(3) 考虑经济因素 $K/\beta T$ 确定补偿容量

$$Q_c = Q_1 - \frac{U_N^2}{2R} \left(\tan\alpha + \frac{K}{\beta T} \right) \tag{3.11-6}$$

式中: Q_c 为电动机的补偿量; Q_1 为电动机固有无功功率需求; U_N 为电动机额定电压; $\tan\alpha$ 为电容器介质损耗; β 为电价; T 为装置年运行时间; K 为电容折旧率; R 为输电线路总阻抗。

1.3.3 分组补偿

分组补偿是在负载相对集中的部分系统中实施的一种无功补偿。它根据这部分负载所需无功就地在这部分供电线路中设置无功补偿, 称之为分组补偿。也可认为这是一种较大范围的就地补偿。分组补偿的参数计算可参考集中补偿的计算。

1.3.4 集中补偿

集中补偿如图 3.11-9 所示。集中补偿是设置在配电所(站)的一种补偿, 它向这一配电系统中的所有需要无功的地方提供无功功率。不再专门考虑系统中的那一部分需要无功的多或少, 而是把这些所有无功需求, 集中在一处设置无功补偿, 称之为集中补偿。显然这种补偿在设置、安装、维护、经济诸方面都有优点, 但在节能/能源利用方面及性价比上略显不足。

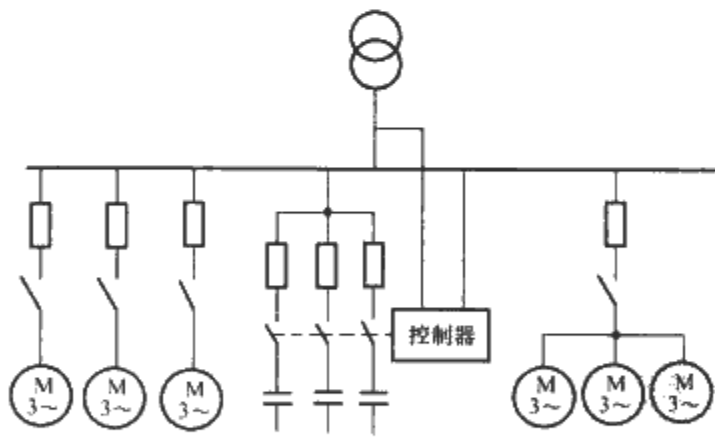


图 3.11-9 集中补偿

2 无功功率补偿控制器

无功功率补偿控制器是用于控制无功功率补偿装置运行的小型控制设备。根据系统无功功率的变化完成补偿电容器的投入、切除, 跟踪负荷的变化做到最佳补偿效果。控制器的工作原理是: 利用相敏电路将采集到的从 A、C 相线电压和 B 相电流信号 (通过 B 相互感器), 检测出无功电流的大小, 方向及与电压的相角差 φ , 再转换成控制信号, 执行元件接通或断开电容器, 实现对电网配电母线的无功功率补偿任务。

2.1 自动投切控制原则

2.1.1 控制器的投切控制的原则

(1) 使电力电容器的运行与变化的负荷相配合, 保持合理的功率因数, 使电网电能损失最小, 获一定的安全、节能效益。

(2) 减小配电母线电压的电压变化幅度, 使用电设备发挥最佳效益减少手动操作的不平滑性。

自动控制方式参量有无功功率控制、功率因数控制、无功电流控制 (含无功电流控制、功率因数锁定)、电压控制、按特定负荷控制以及按每日负荷变化计划控制等。在表 3.11-2 中, 对它们做一些对比。

表 3.11-2 控制参量对比

自动控制方式参量	适用负荷	特 点
无功功率控制	所有变动负荷	可不必选择负荷变化模型, 但不能追踪瞬时无功变化进行补偿
功率因数控制	所有变动负荷	有可能尽管功率因数相同, 由于负荷大、小, 无功功率也有差异, 这就需要有判断电路来修正
无功电流控制	电流大小和无功功率有一定关系的场所	
电压控制	电源阻抗大, 电压变化大的电力系统	一般用于既提高功率因数, 又同时抑制输电线 (母线) 电压降的场合。多为供电部门需要
按特定负荷控制	除在特定负荷变化外, 其余负荷几乎不变的场合	直接控制负荷开关接点投切, 操作简单

2.1.2 无功功率控制

由于电力电容器具有提供电网中超前的无功电力能力, 所以按无功功率控制是一种最合理的方式。

2.1.3 无功电流控制

它以供电线路中流过的无功电流参量来控制无功功率补偿量, 适用于负荷变化不大, 基本上为固定负荷场所。它的控制器设计是先检测出电流, 并按照负荷功率因数、无功功率、负荷电流三者的关系, 找出应投切的电容的数量及运行时间, 完成投切任务。目前, 有采用无功电流控制、功率因数锁定的混合方式, 发挥了两种控制方式的优点, 并克服了其缺点。

2.1.4 电压控制

母线电压的变化基本上都是无功功率引起的。所以这种方式是利用电容器提供无功功率给负荷, 使得电网不再向负荷提供无功功率, 母线上也不流过无功电流, 其引起的电压降消失。此种控制工厂采用的较少, 多用于供电电路末端。

2.1.5 功率因数控制

无功功率因数控制检测的是功率因数。当功率因数低于下限整定值时, 投入补偿电容器; 当功率因数超过上限整定值时, 切除补偿电容器。

2.2 有级电容器的动作程序控制

有级电容器投切动作程序是指: 根据程序, 按一定步长

或其倍数连续对无功功率进行的补偿控制模式。有级电容器投切动作程序工作控制，分循环工作控制和编码工作制两类，循环工作控制是指控制器输出电路取样物理量的变化按先接通的先分断，先分断的先接通的动作方式循环工作控制。

2.2.1 顺序工作控制

顺序工作控制是指控制器输出电路取样物理量的变化按编码进行接通和分断的动作方式为顺序工作控制。

2.2.2 编码工作制

编码工作制是一种按照一定原则，使每台电容器的平均工作时间趋于平衡、提高器件寿命，并有足够时间使电容器放电，降低电容器损坏故障率，延长补偿系统的平均无故障工作时间的有效措施。多年来许多补偿装置生产、研发部门都在控制器的编码规律上进行有益尝试。它们是等值电容器按2进位编码控制、等值电容器按设定时间投切、按设定的电容器回路投切次数记忆控制、循环的非线性投切、优化投切控制等。最新的编码控制是综合考虑电容大小的步长，以及电容器平均工作时间平衡原则。

(1) 循环的非线性投切。按先进先出原则，按1-2-3-4-5顺序投入，则也按1-2-3-4-5顺序切除，在步长的设定上，采用1:2:2:2:2控制比，所有容量“2”的组可参与循环，“1”的组则用于微调，相同组“1:1”“2:2”亦可实现循环。

(2) 优化投切控制。通过不断测量无功的变化，总是可以投入尽可能大的电容器。如25:25:50:50kvar柜中，若无功功率至少需要50kvar时，立即投入50kvar，而不是通过25kvar来累加，由此减少投切次数，提高器件寿命。

(3) 设定的电容器回路投切次数记忆控制。可以查询某一回路、某一段时间内的投切次数，并可预先设定，方便一些特殊控制的需要。

2.3 电容器补偿装置技术的发展

全面推进带串联电抗器的线路保护，可靠的投切接触器，控制理念的完善和更新。在电容器投切支路装设限流电抗器是多年来的经验，在我国最早问世的联合设计-PGJ补偿屏中就有一只空心电抗器装于每一电容器投切支路中。长期生产也遵守这一设计规定，运行稳定可靠。后来，一些企业以成本为由，排斥使用电抗器。但是理论与实践都证明，加入电抗器可以防止涌流，防止电容接入电网带来可能的谐振，限制电力系统高次谐波电压畸变及谐波放大。近年在欧洲采用了充气填充式电容器，普遍都加装了串联电抗器，这是因为当今低压电网中装设的电子设备越来越多，大量的谐波侵入电网，因此可认为，当谐波设备的总功率达到企业用电总功率的10%~15%或5次谐波电压高出电网电压的2%（或总谐波频谱的谐波电压高出电网电压的3%），则必须装设串联电抗器。电抗器的电感量比过去认为的6%、7%有所降低。为此，每相电感L为

$$L = \frac{KU_N \times 10^{-3}}{2\pi f I} \quad (3.11-7)$$

式中： U_N 为每相电压额定值，V； K 为电抗器容量为电网容量的百分比，一般取2%、3%、5%、6%、10%等； I 为每相电容电流，A。

采用熔断器负荷开关时，应依据能承受电容器频繁投入、切除特点及在切断进线电流时不发生再点弧现象的原则。

3 带电抗器无功功率补偿

3.1 带谐振电抗器无功功率补偿

带谐振电抗器无功功率补偿是无功功率补偿的一种形式。它是在无功补偿基础上加入滤波器，同时可完成无功功率补偿及谐波补偿两个任务。此时的滤波器设计成谐振式，属单调谐式，也称无源滤波器。

3.2 带失谐电抗器无功功率补偿

由于电网中除去无功的危害，还有大量的谐波。因此在许多场合，无功补偿设备兼作电网中的若干奇次倍频（主要为5、7、11、13、15、17等）的补偿，这是应用最广的无源补偿设备。其工作原理是谐振法，利用谐振现象将倍频奇次谐波滤除掉（见图3.11-10）。在谐振法中，有一种控制办法是采用失谐的办法，利用失谐电抗器DR使电路工作于失谐状态，目的是防止电网中的谐波放大不产生谐振，以保护电容器。使用失谐电抗器时必须使用配套的失谐电容器。

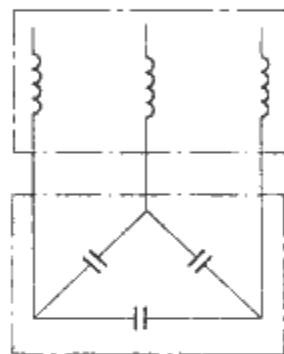


图 3.11-10 带失谐电抗器无功功率补偿

4 无功功率动态补偿装置

4.1 分类

无功功率动态补偿装置主要是用在对冲冲击负荷的无功功率补偿装置。动态无功功率补偿装置是指采用电力电子开关控制（晶闸管）或复合开关（一种有触点接触器和电子开关并联运行的一体化器件）来控制电容器或电抗器，完成无功功率补偿目的设备。有如下几类：饱和电抗器SR（含自饱和电抗器、可控饱和电抗器），晶闸管相控电抗器TCR（含相控电抗器、相控高阻抗变压器），晶闸管投切电容器TSC，TCR+TSC混合型，晶闸管控制电抗器与固定电容器FC等。

4.2 晶闸管相控电抗器

4.2.1 系统组成及原理

晶闸管相控电抗器是由高阻抗变压器（或降压变压器加电抗器）、电容器组（兼作滤波器）、晶闸管阀和调节器等组成。完整的名称叫晶闸管相控电抗型静止无功功率动态补偿装置。由于电容器C为固定值，所以超前的无功功率 Q_C 也为固定值。当负载滞后而无功功率 Q_F 变化时，可以连续控制滞后无功 Q_L 。使 $Q_C - Q_L$ 变化。例如：当 Q_F 增大时，则晶闸管阀控制的电抗器耗用的无功 Q_L 减少；而 Q_F 减少时，则 Q_L 增大，即不管负载的无功功率 Q_F 如何变化，总要使由系统供给的无功功率 $Q_S = Q_F + Q_L - Q_C \approx$ 常数，以限制电压的闪变。用以控制 Q_L 的可变电抗器，是由电抗器（或高阻抗变压器的次级）与各相反并联连接的晶闸管阀组成。利用晶闸管的相位控制，来改变电抗器的电流大小，以达到连

续调节电抗器的基波无功功率 Q_L ，相位控制角 α 从 90° 改变到 180° ，使 Q_L （基波）从 100% 变化到零。当晶闸管在电压正弦波的最大瞬时值下触发（ $\alpha=90^\circ$ ）时，电抗器 L 开始流过电流，这时电感储存能量；当电压波形到达 180° ，由正值变为负值，电感储存的能量被释放，电流继续流通，直到电压的正弦波到达 270° 处，电抗器储存的能量全部放完，这期间，晶闸管处于全开放，电流相当于高阻抗变压器的短路电流，由此完成一个循环。

4.2.2 基本线路

由一个一次绕组为三角形连接，二次绕组为开口星形连接的高阻抗变压器，或降压变压器加电抗器，以及晶闸管组成。高阻抗变压器将二次电压降低到对晶闸管来说是经济的值，同时它有产生滞后无功功率的电抗。也就是说，在充分利用晶闸管电流容量的前提下，为满足一定无功功率的要求，确定变压器的二次电流值，从而计算出变压器的二次电压值，以及晶闸管必需的串联数。这样就可以使晶闸管总的使用量为最少，TCR 型补偿装置的成本也就最经济。一次绕组接成三角形是为了使晶闸管相控电抗器在不同导通状况下产生的三倍频谐波成分不流入系统。二次绕组接成开口星形，中性点分开，这是要使每相负载与另二相独立，从而正序和负序的幅值可以单独控制，分相调节，以使对不平衡负载（如电弧炉）可以获得平衡。

高阻抗变压器的内部结构和通常的电力变压器基本相同，为内铁心式，二个绕组同心排列。但微小的差别是：

- (1) 绕组匝数多。
- (2) 一次绕组和二次绕组的距离大。

4.3 TCR 静止型无功补偿装置参数计算

下面举例说明 TCR 静止型无功补偿装置参数计算。先以标么值列出计算方法，然后代入数据计算结果。已知电网电压为 220kV，补偿范围为 50MVA（容性） \sim -30MVA（感性），补偿方案为 FC+TCR（固定电容器+晶闸管相控电抗器），降压变压器的百分阻抗 $X\%=12$ ，则

- (1) 取补偿无功功率

$$Q_k = 50\text{MVA} = 1.0\text{p. u. (感性)}$$

- (2) 再取变压器一次电压

$$U_1 = 220\text{kV} = 1.0\text{p. u.}$$

- (3) 计算电容器组阻抗（ $\alpha=180^\circ$ ）。

- 1) 先得变压器一次侧补偿容性无功功率

$$Q_k = 50\text{MVA} = -1.0\text{p. u.}$$

- 2) 变压器一次电压

$$U_1 = 1.0\text{p. u.}$$

- 3) 变压器一次电流

$$I_1 = \frac{Q_{k1}}{u_1} = \frac{-1}{1} = -1.0\text{p. u.}$$

- 4) 变压器二次电压

$$U_2 = U_1 - X\%I_1 = 1 - 0.12 \times (-1) = 1.12\text{p. u.}$$

- 5) 变压器二次侧补偿容性无功功率

$$Q_{k2} = U_2 \times I_2 = 1.12 \times (-1) = -1.12\text{p. u.}$$

- 6) 容抗值

$$X_C = \frac{U_2^2}{Q_{k2}} = \frac{(1.12)^2}{-1.12} = -1.12\text{p. u.}$$

- (4) 计算电感（ $\alpha=90^\circ$ ）。

- 1) 先得变压器一次感性无功功率（感性）

$$Q_{k1} = 30\text{MVA} = \frac{30}{50} = +0.6\text{p. u.}$$

- 2) 变压器一次电压

$$U_1 = 1.0\text{p. u.}$$

- 3) 变压器一次电流

$$I_1 = \frac{Q_{k1}}{U_1} = \frac{0.6}{1} = I_2$$

- 4) 变压器二次电压

$$U_2 = U_1 - X\% \times I_1 = 1 - 0.12 \times 0.6 = 0.928\text{p. u.}$$

- 5) 变压器二次容性无功功率

$$Q_C = \frac{U_2^2}{X_C} = \frac{0.928^2}{-1.12} = -0.769\text{p. u.}$$

- 6) 变压器二次电容电流

$$I_C = -\sqrt{\frac{Q_{C2}}{X_C}} = -\sqrt{\frac{-0.769}{-1.12}} = -0.829\text{p. u.}$$

- 7) 变压器二次电感电流

$$I_L = I_2 - I_C = 0.6 - (-0.829) = 1.429\text{p. u.}$$

- 8) 变压器二次感性无功功率

$$Q_L = U_2 \times I_L = 0.928 \times 1.429 = 1.326\text{p. u.}$$

- 9) 感抗值

$$X_L = \frac{U_2^2}{Q_L} = \frac{(0.928)^2}{1.326} = 0.65\text{p. u.}$$

(5) 代入数据计算。根据晶闸管的容量（选用晶闸管正向平均电流 $I_{kp}=800\text{A}$ ），确定实际的电抗器电流 $I_L=1190\text{A}$ ，此系三角形连接的相电流，其标称值为 $I_L=1.429\text{p. u.}=1190\text{A}$ ，变压器二次侧实际相电流 $I_{2(1ps)} = \left(\frac{1290}{1.429}\right)\text{A} = 872.7\text{A}$ 。

- 1) 电抗器实际容量

$$Q_{L(\alpha=90^\circ)} = 1.326\text{p. u.} = 1.326 \times 50 = 66.3\text{MVA}$$

- 2) 变压器二次侧满载相电压

$$U_{2(0.928\text{p. u.})} = \left(\frac{1}{3} \times \frac{66.3}{1.190}\right)\text{kV} = 18.6\text{kV}$$

- 3) 变压器二次侧空载相电压

$$U_{2(1.0\text{p. u.})} = \left(\frac{18.6}{0.928}\right)\text{kV} = 20.04\text{kV}$$

- 4) 变压器二次侧容量

$$S_2 = 3I_2U_2 = (3 \times 872.75 \times 20.04)\text{MVA} = 52.37\text{MVA}$$

- 5) 变压器一次侧容量 $S_1 = 1\text{p. u.} = 50\text{MVA}$

- 6) 变压器型式容量

$$S_{TP} = \frac{S_1 + S_2}{2} = \left(\frac{50 + 52.734}{2}\right)\text{MVA} = 51.182\text{MVA}$$

4.4 晶闸管投切电容器 (TSC)

4.4.1 系统原理和组成

晶闸管投切电容器 (TSC) 静止型补偿装置，它由降压变压器、电容器组（分成若干小组）、晶闸管阀（分成若干小组）、调节器四部分组成。根据负载感性无功功率的变化，切除或投入电容器，晶闸管阀在这里作为投切电容器的开关。在实际系统中，每个电容器组还要串联一个阻尼电抗器，以降低晶闸管可能产生的电流冲击，以避免与系统阻抗产生谐振现象。

4.4.2 晶闸管投切电容器的过程

投入电容器易引起电流冲击，设电容器 C_1 已投入，此时电压为 U_1 ，按照电路原理得

$$Q(0_-) = C_1 U_1(0_-)$$

如果电容器 C_2 原来电压是 U_2 ，则有

$$Q_2(0_-) = C_2 U_2(0_-)$$

(0₋) 为投入前瞬间的值。当投入 C_2 后，必然会使 C_1

及 C_2 上的电压相等, 即 $U_1(0_+) = U_1(0_-) = U(0_+)$; (0_+) 为投入后瞬间的值。由于电容器投入瞬间的电量不能突变, 则

$$U_1(0_+) = \frac{Q(0_-) + Q(0_-)}{C_1 + C_2} = \frac{C_1 U_1(0_-) + C_2 U_1(0_-)}{C_1 + C_2}$$

设 $U_2(0_-) = U_1(0_-)$, 上式可写成

$$U_1(0_+) = \frac{C_1 + C_2}{C_1 + C_2} U_1(0_-) = U(0_-)$$

其瞬时冲击电流为

$$I_{c2} = C_2 \frac{du_c}{dt} = C_2 \frac{d[U(0_+) - U_1(0_-)]}{dt} = 0$$

这就说明, 如果第二组电容器在投入时, 其电压和电网电压等值且同步。则从理论上说, 不可能产生冲击。如果第二组电容器在投入前未充电, 则应在电网电压过零时投入, 才不会产生电流冲击。

用晶闸管投切电容器组时, 电容器只是在二个极端电流值(零电流和额定正弦电流)之间切换, 所以不产生谐波。

4.5 TCR+TSC 混合型静止型无功功率补偿装置

TSC 方案本身不产生谐波, 但是无功功率补偿装置只能以阶梯变化的方式来满足系统对无功的补偿需要, 而 TCR 方案响应快, 即有平衡负载的能力。它在电弧炉的补偿方面有特殊的优点, 但它本身会产生谐波。因而, TCR 方案用于输电线路补偿是有经济上的缺点, 这是由于它在零功率输出状态下的能耗造成的, 因为在零功率输出状态时, 固定电容器中的容性电流必须由晶闸管相控电抗器中的感性电流来平衡。流过电容器、电抗器和晶闸管中的额定电流使损耗达到最大, 而且在输电系统中, 一般都长期运行在这种状态, 从而造成的经济损失较大。

4.5.1 TSC+TCR 系统的工作原理

按所需的无功补偿值, 投入适当的电容器组, 并略有一点正偏差(即过补偿), 此时在用晶闸管相控电抗器的感性无功功率抵消这部分过补偿的容性无功功率。从而输电线路

补偿所希望的特性, 即无功功率输出可在容性和感性范围内连续调解, 在零(或很低)无功输出输出时的损耗可忽略不计。在电力系统大扰动期间或扰动过后, 因其电容器组和电抗器可分别切除和投入, 可使瞬变过电压限制到最低。

4.5.2 TSC+TCR 系统的控制

它比 TCR 装置的控制多了一个电容器调节, 其他分别与 TSC、TCR 控制相类似。在补偿装置中电抗器的容量较小(几乎是最大输出的 $1/n$), 而电容器组的容量分段是电抗器组既处在正常控制范围内, 又能满足分段间的细调。为了使分段切换不中断, 电抗器的容量要稍大于一个电容器组的容量, 以使“投入”和“切除”无功功率值之间有一点重叠。

4.5.3 晶闸管的参数计算

下列晶闸管的参数计算适用于 TSC+TCR 系统和 TSR+系统以及 TSC 系统。

(1) 晶闸管阀的电流计算。本系统晶闸管的工作范围是 $\alpha=90^\circ \sim 180^\circ$ 。当 $\alpha=90^\circ$ 时电流 I_L 最大, 为正弦波, 其峰值为 $\sqrt{2}I_L$, 负载的正半波流过晶闸管 I_{kp1} , 负载电流的负半波流过晶闸管 I_{kp2} 。根据电力电子元件的标准, 由于晶闸管的电流定额是以通态平均值标称, 所以

$$\begin{aligned} I_{kp} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}I_L \sin\theta d\theta = -\frac{\sqrt{2}I_L}{2\pi} \cos\theta \Big|_0^\pi \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_L = \frac{1}{2.2} I_L \end{aligned}$$

因此, 在正常情况下, 电流 I_L (有效值) 是晶闸管电流 I_{kp} (平均值) 的 2.2 倍。但是晶闸管电流容量还需要考虑到故障情况下的过电流。

(2) 阀电抗器短路电流。晶闸管是以电抗器作为其负载的, 为了减少由于电抗器短路造成晶闸管极大的短路电流。为减少电抗器短路电流对晶闸管的冲击, 一般将电抗器一分为二, 阀的上、下各接一个, 这样, 当电抗器发生短路, 短路电流为二倍电抗器短路电流(因为电抗器的电抗减少一半)。

第12章 谐波补偿装置

1 谐波与谐波源

1.1 谐波

按 IEC 的定义：谐波是一种周期量的傅里叶级数中，次数高于1的 h 次分量。而“ h 次”的含义是：谐波频率与基波频率之比，是整数。按 IEEE-519 定义：谐波是一个周期波或量的正弦波分量，频率为基波频率的整倍数。在电压量中，通常用谐波电压含量 U_h 来说明它的存在和大小，记为

$$U_h = \sqrt{\sum U_h^2} \quad (3.12-1)$$

谐波电流记为

$$I_h = \sqrt{\sum I_h^2} \quad (3.12-2)$$

式中： U_h 、 I_h 为 h 次谐波分量的有效值。

一般来说谐波的次数是整数，但有时会有不是整数的情况，即为非整数，此时称之为谐波。

谐波畸变是描述谐波畸变的量化指标。有总谐波畸变 THD 和总谐波因数 THF 两种基本概念和定义。THD 与所考虑量的分量有关。THF 与所关心的有效值有关。总谐波畸变 THD 和总谐波因数 THF 定义如下。

对电压量有

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{U^2 - U_1^2}}{U_1} \quad (3.12-3)$$

$$\text{THF} = \frac{\sqrt{U^2 - U_1^2}}{U} \quad (3.12-4)$$

对电流量有

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} \quad (3.12-5)$$

$$\text{THF} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I} \quad (3.12-6)$$

式中： U_1 、 I_1 为基波有效值； U 、 I 为总有效值。

1.2 谐波的产生及危害

1.2.1 谐波的产生

产生谐波的设备主要是工作于频率变化的设备，对那些直接使用工频电源的设备，有的属于非线性负荷，也会由于非线性原因产生谐波。例如，通过住宅楼宇中产生谐波的设备负荷表计算出工作于变化频率的设备总视在功率 $S_B = 948.3\text{VA}$ ，相应的计算电流相电流 $I_B = 144.1\text{A}$ ，中性线电流 $I_{NB} \approx 2I_B = 288.2\text{A}$ 。这样，造成中性线电流 I_{NB} 过大的原因就是谐波。

1.2.1.1 电力电子设备

电力电子设备已成为电力系统中的主要谐波源，而且还消耗了大量的无功功率，因此研究各类电力电子装置谐波限制，消除它对电网的影响既重要又急需，否则将严重影响电力网中电力电子装置的广泛应用。

(1) 整流设备。自整流设备问世以来，包括早期的水银整流器（后称有泵汞弧阀、无泵密封汞弧阀）到现代的硅二

极管、晶闸管等整流装置。由于晶闸管等相控的原因，产生了大量谐波，它对负载产生谐波电压、对电网索取谐波电流。

(2) 变流装置（SCR）产生谐波无功。理论证明：三相全控桥整流逆变装置，6只晶闸管对称触发时产生 $6N \pm 1$ 次谐波，幅值为12相变流装置产生 $12N \pm 1$ 次谐波。变流器是电力系统的主要谐波源。采用多重化、多电平控制是减小变流器谐波的有效方法。众所周知，对三相桥式整流电路理论上所产生的特征谐波次数为 $N = 6k \pm 1$ ， $k = 1, 2, 3, \dots$ 。存在5, 7, 11, 13, ...次谐波，若采用12相、24相、36相等多相整流的多重化结构。将整流变压器二次侧绕组构成星、角接线，使相位差为 30° 、 15° 、...可使高次谐波含量大大减小。由此可见，增加变流器的相数可有效地消除低次谐波，整流相数越多，所产生的谐波分量越少。在轧钢机和电冶金电解整流电源工程中多数采用12相、24相整流技术，对特大容量的也采用36相、48相整流。根据不平衡三相负载理论：三相负载电流由三相平衡的正序电流和三相不平衡的负序电流及零序电流组成（无零线的系统无零序电流）。如果系统无零序电流，通常将解决三相不平衡负载的平衡化问题归结为消除三相不平衡负载的负序电流。理论证明：三相负载电流 I_a 、 I_b 、 I_c 中如果没有无功电流，并且零序电流为零，负序电流必然为零，即三相电流对称。那么三相不平衡负载的平衡化问题就转为各相无功电流的补偿问题。

(3) 半导体电气传动设备。指变速传动装置、电动机电子式起动设备（低压软起动装置及中压软起动装置）。它是大、中型工业机械装备的主要配套电器设备，主要用在冶金、矿山、船舶、港口、化工、化纤、造纸、轻工、水泥、建材、通用机械等。

1) 直流传动整流装置的谐波电流。网侧谐波电流次数为

$$h = km \pm 1 \quad (3.12-7)$$

式中： h 为谐波电流的次数； k 为正整数， $k = 1, 2, 3, \dots$ ； m 为整流器整流电压脉动数，例如整流器为三相桥， $m = 6$ ，则谐波电流的次数为5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, ...，一般考虑到25次已足够。

谐波电流有效值为

$$I_h = \frac{I_1}{h} \frac{\sin \kappa \frac{\gamma}{2}}{\kappa \frac{\gamma}{2}} \quad (3.12-8)$$

式中： I_1 为基波电流有效值； γ 为换相重叠角，rad。

当换相重叠角很小时，则有 $\frac{\sin \kappa \frac{\gamma}{2}}{\kappa \frac{\gamma}{2}} \approx 1$ ，有 $I_h = \frac{I_1}{h}$ 。但

实际按式(3.12-8)计算的谐波电流有效值都偏大，可改用下式

$$I_h = \frac{I_1}{h} = \kappa_h \frac{I_1}{h} \quad (3.12-9)$$

κ_h 修正系数与脉动数 m 有关, 可从表 3.12-1 中查得。

表 3.12-1 修正系数 κ_h

h	5	7	11	13	17	29	23	25
$m=6$	1.0	1.0	0.75	0.70	0.50	0.40	0.25	0.20
$m=12$	0.30	0.30	0.75	0.70	0.20	0.15	0.25	0.20

2) 电压型交—直—交变频器的谐波电流。对电网来说变频器的一部分是整流器, 其网侧谐波电流次数 h 为

$$h = km \pm 1 \tag{3.12-10}$$

式中: h 为谐波电流的次数; k 为正整数, $k=1, 2, 3, \dots$; m 为整流器整流电压脉动数, 例如整流器为三相桥, $m=6$, 则谐波电流的次数的次数为 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, \dots , 一般考虑到 25 次已足够。

3) 交—交变频器的谐波电流。交—交变频器实际上就是其直流输出电压按正弦波调制的可逆整流器。因此它和一般整流器一样, 其网侧电流中除基波外, 也含有 $km \pm 1$ 次的整数次谐波电流。这些谐波电流的频率只和交—交变频器的输入(网侧)频率和相数有关, 称为特征谐波。其网侧电流中还存在着与交—交变频器的输出频率和相数有关的非整数次谐波电流, 称为旁频谐波。交—交变频器网侧电流总的频谱为

$$f_v = \sum |(pm \pm 1)f_n \pm 2qnf_o| \tag{3.12-11}$$

式中: f_v 为交—交变频器网侧电流的频率; f_n 为交—交变频器电源的频率; f_o 为交—交变频器输出的频率; m 为交—交变频器对电源的脉动数; n 为交—交变频器输出的相数; p 为正整数, $p=0, 1, 2, 3, \dots$; q 为正整数, $q=1, 2, 3, \dots$ 。

4) 中压变频调速设备。中压变频调速设备的谐波电流随着调速装置的线路原理不同, 产生的谐波也不同。

1.2.1.2 民用电子设备

民用电子设备包括电视机、电冰箱、洗衣机、小家用电器等。电视机产生的谐波如图 3.12-1 所示。

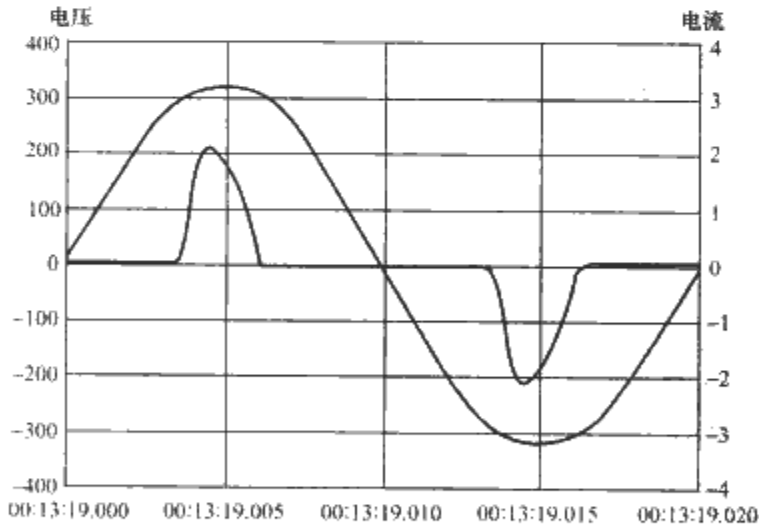


图 3.12-1 一台电视机电源波形图

1.2.1.3 办公设备

办公、信息设备, 例如单项负荷, 包括打印机、打字机、复印机、传真机、扫描仪、开关电源、荧光灯镇流器、小型 UPS。它们产生的谐波分别如图 3.12-2~图 3.12-6 所示。

1.2.1.4 工业设备

包括电弧炉、中频冶炼、加工, 如加热炉、电焊机(大型汽车厂、造船厂、金属结构厂等)。

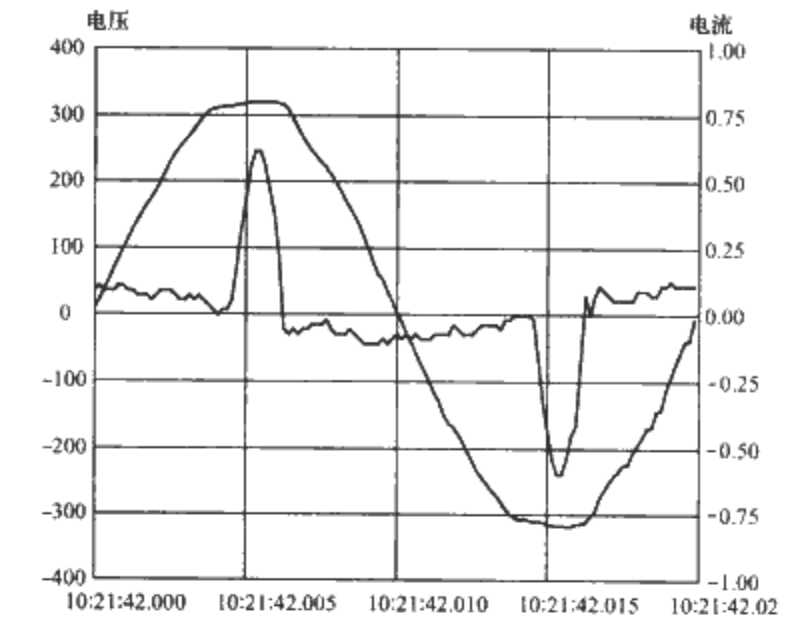


图 3.12-2 一台打字机电源波形图

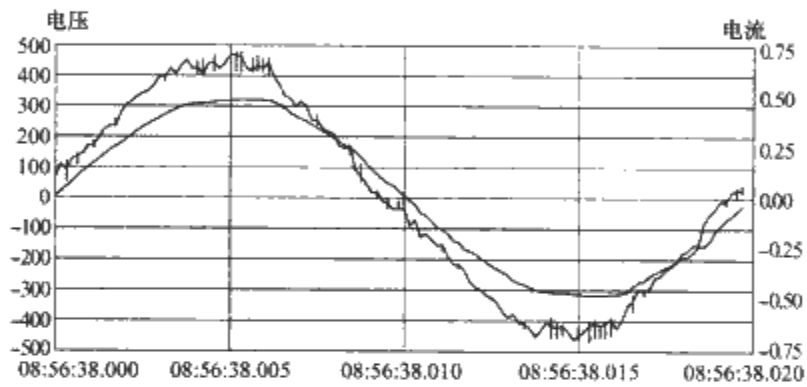


图 3.12-3 荧光灯电源波形图

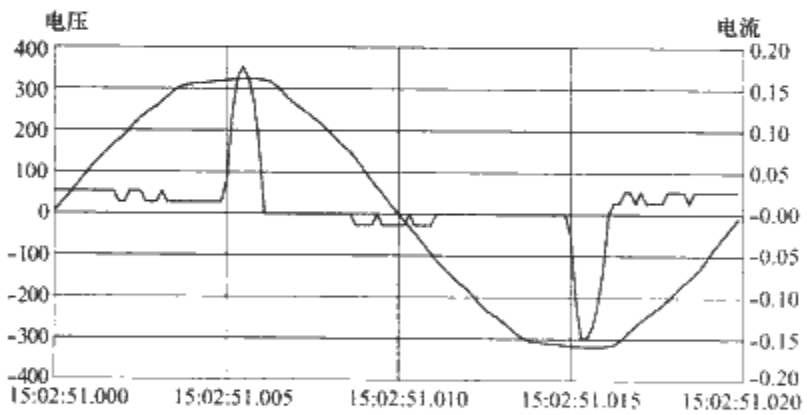


图 3.12-4 一台传真机电源波形图

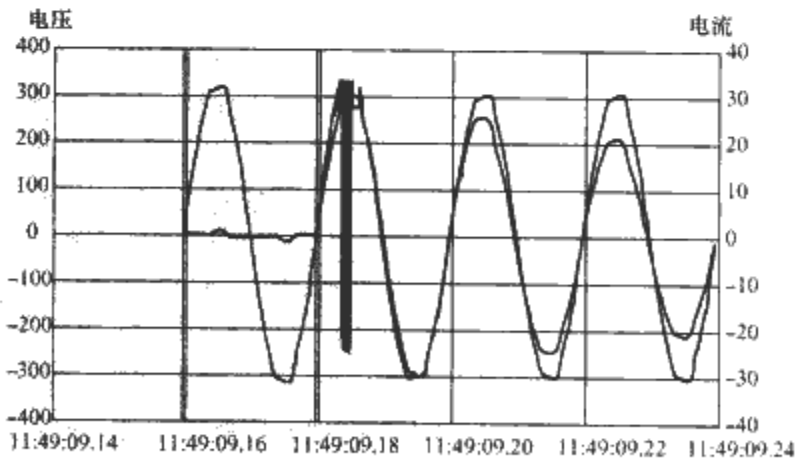


图 3.12-5 一台复印机电源波形图

电弧炉的波形及谐波含量如图 3.12-7~图 3.12-9 所示。表 3.12-2 是电弧炉引起的平均谐波电流。

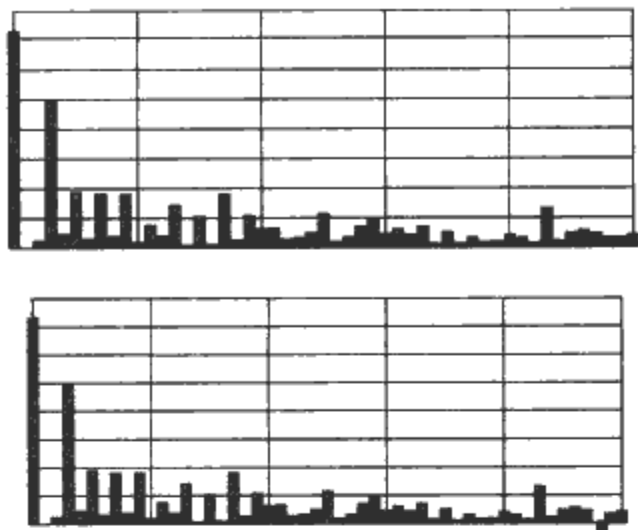


图 3.12-6 办公室电源谐波含量图

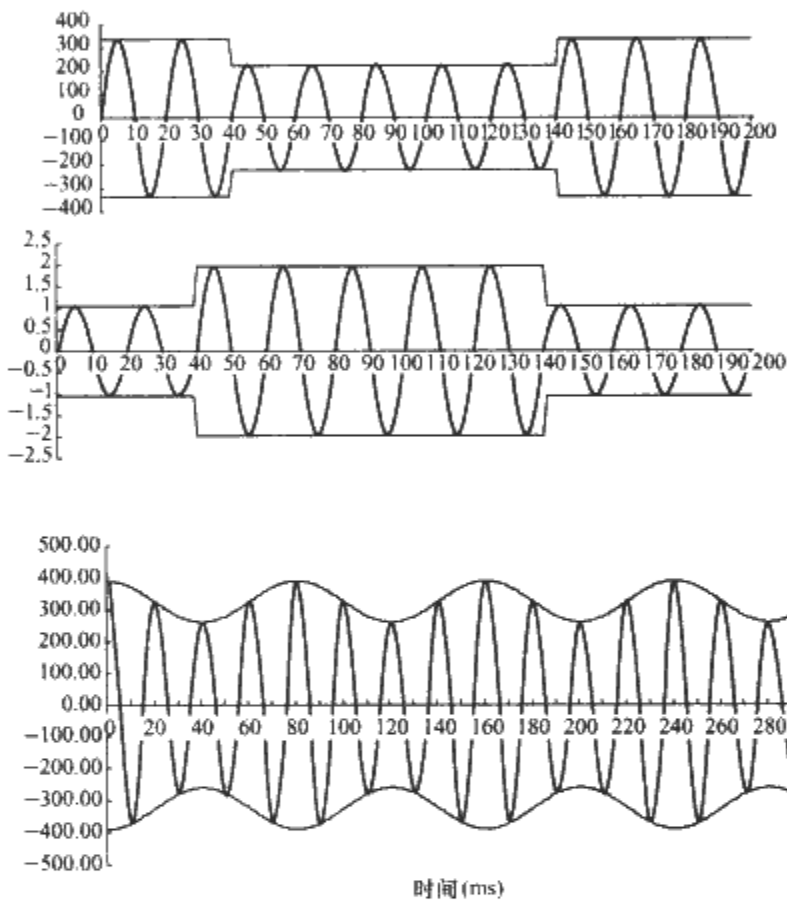


图 3.12-7 大功率电弧炉的电压电流波形图

谐波次数	谐波电流 (以百分数表示)		
	I 号炉	II 号炉	III 号炉
2	3.2	4.1	4.5
3	4.0	4.5	4.7
4	1.1	1.8	2.8
5	3.2	2.1	4.5
6	0.6	—	1.7
7	1.3	1.0	1.6
8	0.4	1.0	1.1
9	0.5	0.6	1.0
10	0.5	0.5	1.0

由表 3.12-2 可以看出：2 次、3 次、5 次最为严重，同时结合图 3.11-8 可知，电弧炉是一种产生谐波的主要谐波源。

1.2.2 谐波的危害与对策

谐波对电网的影响是多方面的：

(1) 谐波引起的谐振和电流放大。为了补偿负载的无功

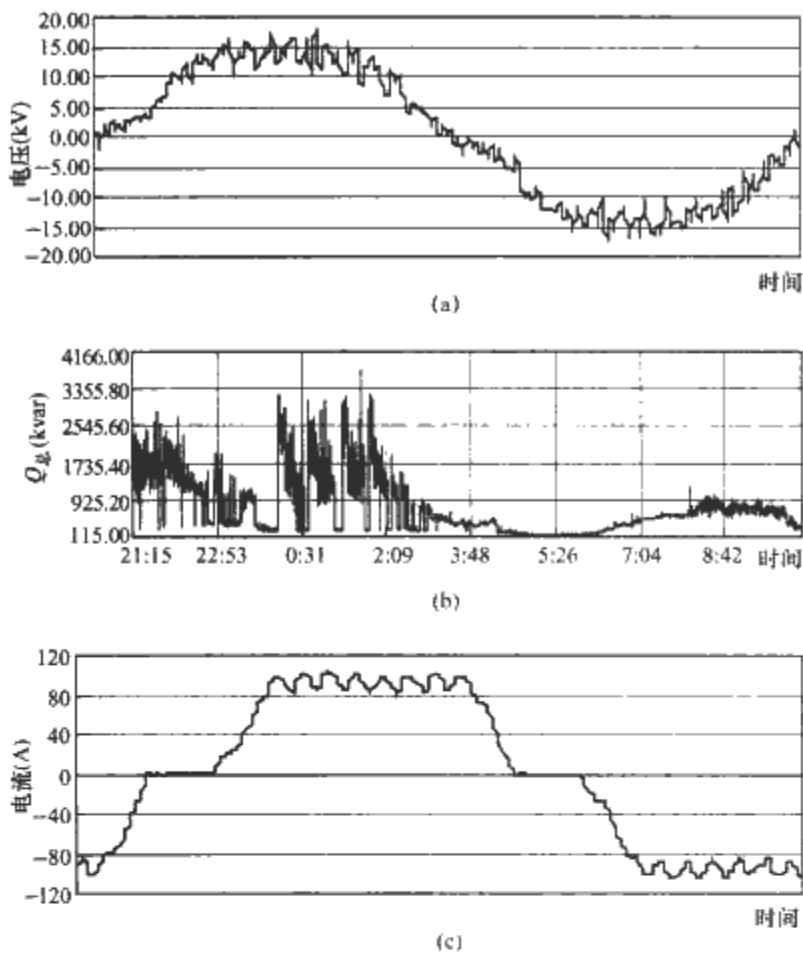


图 3.12-8 电弧炉 10kV 波形图
(a) 10kV 电压变化；(b) 无功功率需求变化；
(c) 10kV 电流波形

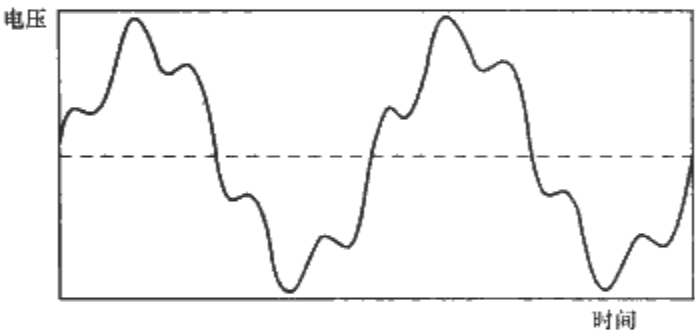


图 3.12-9 大功率工业电弧炉的电网电压波形图

功率及提高功率因数，需在靠近负载处安装电容器。同时为了滤除谐波，还会装设由电抗器和电容器组成的滤波器。对工频来说当其容抗大于感抗时不会产生谐振，但对谐波频率而言，其感抗随谐波频率而放大（甚至放大几十倍），引起并联谐振或串联谐振，引起的谐振电压对电网来讲，是不可接受的，这就是事故。所以常在电容支路中串入 2%~5% 的电抗器，防止谐振。

(2) 谐波对用电设备（变压器与电动机）的影响。谐波对变压器与电动机的影响主要是引起设备的附加损耗和热损耗，以及机械振动，甚至共振，一般对电动机要求允许的负序值不超过额定值的 2%~3%。无功功率补偿装置具有从变压器输出有功电流小的相抽取一定的有功电流，通过送到有功电流大的相上去的作用，使变压器输出个各相对负载只输送有功电流，其幅值为原负载总有功电流的 1/3。在玻璃行业、晶体制造、三相供电单相使用等都是三相不平衡负载，都可以选取无功功率补偿装置解决平衡化问题。例如，某厂负载严重非对称供配电系统的损耗与供配电系统通过的总电流的平方成正比，系统总电流下降到 0.707，损耗将下降 50%，加入谐波补偿后可提高变压器使用容量及效率。

(3) 异步交流电动机的功率因数 $\cos\varphi=0.9\sim0.6$ ，在中、轻载运行时 $\cos\varphi=0.8\sim0.4$ ，在起、制动过程中 $\cos\varphi=0.4\sim0.2$ 。

(4) 谐波对用电设备电力测量及继电保护的影响。谐波对用电设备电力测量及继电保护的影响是会改变保护继电器性能,引起拒动或误动,例如电流保护继电器对谐波敏感。

(5) 谐波对通信系统的干扰。一般会引起通信噪声,因电网与通信线路间有耦合电磁感应。静电感应耦合(存在耦合电容)与谐波频率成正比,特别是对那些电话线距输电线很近,而平行距离又很长时,更要注意这种影响。

(6) 谐波对敏感用电设备影响。在商业、制造业、办公室及家庭中个人计算机(信息)设备的激增。有了这些敏感设备后,使其电路更易受电磁波的干扰,电路变得越来越细小、电路板上相邻电路也越来越挤、过电压的击穿危险增大了、相邻信号通道的干扰也增加了。进而微处理芯片变得更小、更密,妨碍了热量的逸散,使它们变得不坚固、不耐用,在因工作电压不断降低,数字量的“1”的电位已降低到3.5~5.0V,造成某些很小的瞬间过电压就可能导致运算错误。显然避免瞬间过电压和高频干扰对敏感用电设备(微电子电路)是非常重要的。

2 无源谐波补偿

谐波补偿的方式有许多方式。常用的有动态补偿,滤除高次谐波的电力滤波器(又分滤波器兼作无功补偿用和滤波器只作滤波用),使用串联电抗的无功补偿电容组来滤除谐波,及有源谐波补偿等。其中动态补偿可对任何负载情况进行实时快速补偿,并有稳定电网电压功能,提高电网质量,无触点零电流投切技术增加了电容器使用寿命,同时具备治理谐波的功能。无源谐波补偿是应用产品中补偿效果较好的一种补偿。用于低压电网,靠近负载,采用TFC(晶闸管开关滤波器)动态无功功率补偿技术,晶闸管以10ms速度直接将滤波器投入电网,实现了低成本、高效益。采用计算机数字化控制技术,对三相对称或非对称供电线路中的无功功率进行实时、动态跟踪补偿,使功率因数始终保持在0.90以上。在电网电压高低不同时采用不同的补偿算法以确保不发生欠补偿和过补偿。过补偿会引起电网电压升高。

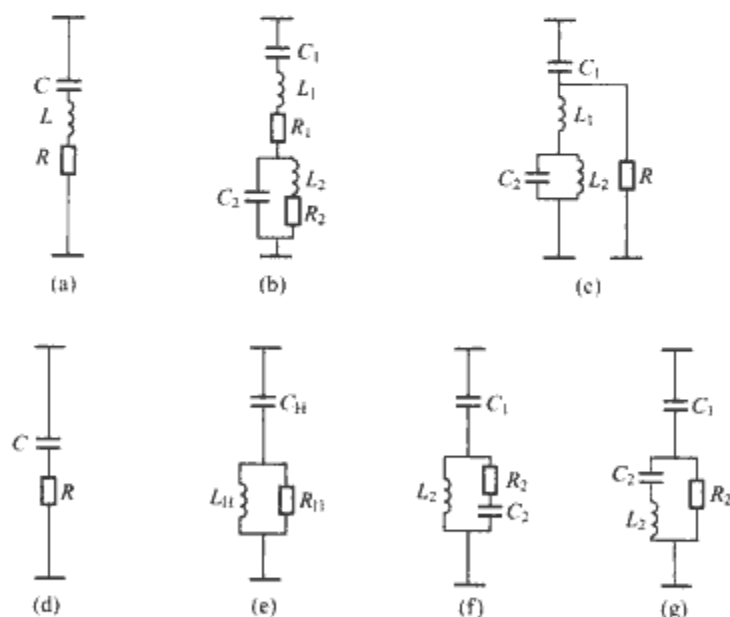


图 3.12-10 无源电力滤波器的电路

(a) 单调谐滤波器; (b) 双单调谐滤波器; (c) 双单调谐带高通特性的滤波器; (d) 一阶减幅型滤波器; (e) 二阶高通滤波器; (f) 三阶高通滤波器; (g) C型阻尼滤波器

2.1 谐振式滤波器谐波补偿

谐振式滤波器谐波补偿方式是指采用提供LC谐振滤波器接入线路,使其工作于需要滤除的谐振频率,呈现对谐波

电流的低阻抗,从而达到去除谐波目的。谐振式滤波器谐波补偿是应用最广、价格便宜,性价比较好的方式之一。

2.2 滤波器

滤波器的接线方式如图3.12-10所示,由电抗器、电容器、电阻器组成。其中图3.12-10中(a)为一阶、单调谐型; (b)为双单调谐型; (c)为双单调谐带高通特性型; (d)为1阶衰减型; (e)为二阶高通滤波型; (f)为三阶高通滤波型; (g)为C阻尼滤波型、在二阶和三阶之间。常用的有单调谐型和双单调谐型、二阶高通滤波型,C型也有推广价值。在既有无功补偿、又有谐波补偿的无源滤波装置中,多用图3.12-10(a)的1阶型。只是其滤波谐振频率要略小于谐振频率(做成失谐型或调谐型)。对单调谐型,其阻抗和频率之间的关系为

$$Z = R + j(\omega L + 1)/\omega C \quad (3.12-12)$$

双调谐型有两个谐振频率,可同时吸收两个频率的谐波,相当于两个单调谐型,但损耗要比前者大。

2.3 带电抗器无功功率及谐波补偿

2.3.1 带谐振电抗器无功功率及谐波补偿

(1) 带谐振电抗器无功功率补偿是无功功率补偿的一种形式。它是在无功补偿基础上加入滤波器,形成无功功率动态补偿,同时可完成无功功率补偿及谐波补偿两个任务。此时的滤波器设计成谐振式,属单调谐式,也称无源滤波器。

(2) 动补装置容量补偿效果估算。举例来说明动补装置容量及节电效果估算。某配电的一台1000kVA/400V的变压器,当前变压器满负荷运行时的功率因数 $\cos\varphi=0.75$,现在需要安装TP-TFC动补装置,要求将功率因数提高到0.95,那么补偿装置的容量值多大?在负荷不变的前提下安装TP-TFC,动补装置后的增容量为多少?若电网传输及负载压降按5%计算,其每小时的节电量为多少?

$$\text{补偿装置容量} = \{ [\sin(\arccos 0.75) - \sin(\arccos 0.95)] \times 1000 \} \text{ kvar} = 350 \text{ kvar} \quad (3.12-13)$$

$$\text{安装 TP-TFC 动补装置前的视在电流} = \left(\frac{1000}{0.4 \times \sqrt{3}} \right) \text{ A} = 1443 \text{ A} \quad (3.12-14)$$

$$\text{安装 TP-TFC 动补装置前的有功电流} = (1443 \times 0.75) \text{ A} = 1082 \text{ A} \quad (3.12-15)$$

$$\text{安装 TP-TFC 动补装置后视在电流降低} = \left(1443 - \frac{1082}{0.95} \right) \text{ A} = 304 \text{ A} \quad (3.12-16)$$

$$\text{安装 TP-TFC 动补装置后的增容量} = (304 \times \sqrt{3} \times 0.4) \text{ var} = 211 \text{ var} \quad (3.12-17)$$

$$\text{增容比} = \frac{211}{1000} \times 100\% = 21\% \quad (3.12-18)$$

$$\text{每小时的节电量} = \left(\frac{304 \times 400 \times 5\% \times \sqrt{3} \times 1}{1000} \right) \text{ kW} \cdot \text{h} = 11 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

(3) 动补装置容量及参数计算。一般来说滤波装置(滤波器做滤波兼作无功补偿用)补偿容量 Q_m 中作为滤波目的的容量只占一小部分,其余大部是无功补偿用,既利用滤波装置的电容提供所需的基波无功功率。而只作滤波用的滤波器的电容,只提供谐波无功功率。这时设计滤波器的电容只要按电容安装量的最小值考虑即可。

1) 滤波器兼作无功补偿用。滤波器兼作补偿用计算原

则是每相安装容量接近于每相可输出的无功功率。其选择步骤应先根据已知 I_v 求各次滤波可输出的无功 Q_{1vmin} 进而求 ΣQ_{1vmin} 。然后比较 ΣQ_{1vmin} 及要求滤波器每相输出的无功 Q 满足以下条件, $\Sigma Q_{1vmin} = Q$ 。

2) 滤波器只作滤波用。滤波器只作滤波用时, 设 $Q_v = Q_{vmin}$ 原则, 则

每相电容最小安装量

$$Q_{vmin} = \frac{h^2}{h^2 - 1.05} \frac{2}{\sqrt{h}} I_{hU} = \frac{h^2}{h^2 - 1.05} 2Q_{1hmin} \quad (3.12-19)$$

每相电容的容抗

$$X_{1Cv} = \frac{h^2}{h^2 - 1.05} \frac{3U^2}{\Sigma Q_{1h}} = \frac{h^2}{h^2 - 1.05} \sqrt{h} \frac{U}{I_h} \quad (3.12-20)$$

$$\text{每相电容量 } C_v = \frac{1}{\omega} \frac{1}{X_{1Cv}} = \frac{1}{\omega} \frac{h^2}{h^2 - 1.05} \frac{\Sigma Q_{1h}}{3U^2} = \frac{1}{\omega} \frac{h^2}{h^2 - 1.05} \frac{1}{\sqrt{h}} \frac{I_h}{u} \quad (3.12-21)$$

输出的基波无功功率为

$$\Sigma Q_{1h} = 3S_{hmin} = \frac{3}{\sqrt{h}} I_h u \quad (3.12-22)$$

(4) 设计举例。求4台1600kW构成2套12脉动(6脉动, $\Delta-Y$ 接组成)的变流装置, 过载倍数为2倍, 平均功率因数为0.7, 由5、7、11、13次滤波器组成滤波装置, 试计算它的参数。滤波参数选择:

有功功率 $P_{max} = (2 \times 4 \times 1600) \text{ MW} = 12.8 \text{ MW}$

视在功率 $S_{max} = \frac{P_{max}}{\cos \varphi_1} = \left(\frac{12.8}{0.7} \right) \text{ MVA} = 18.3 \text{ MVA}$ (3.12-23)

额定电压时的基波电流

$$I_1 = \frac{S_{max}}{\sqrt{3}U_N} = \left(\frac{18.3 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 6300} \right) \text{ A} = 1679 \text{ A}$$

各次谐波电流

$$I_h = \frac{nI_1}{h} \quad (3.12-24)$$

$$I_5 = \left(\frac{0.3 \times 1679}{5} \right) \text{ A} = 100.74 \text{ A}$$

$$I_7 = \left(\frac{0.3 \times 1679}{7} \right) \text{ A} = 71.96 \text{ A}$$

$$I_{11} = \left(\frac{0.75 \times 1679}{11} \times 0.8 \right) \text{ A} = 91.85 \text{ A}$$

$$I_{13} = \left(\frac{0.75 \times 1679}{13} \times 0.8 \right) \text{ A} = 77.49 \text{ A}$$

注: 相同次数谐波电流代数和稍微比几何相加大一些, 这里需求的是几何和, 计算式中要乘以一个修正数为0.8。

如要求补偿到功率因数为 $\cos \varphi_2 = 0.9$, 则总补偿功率为

$$\begin{aligned} Q_{com} &= Q_1 - Q_2 = P_{max} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \\ &= [12.8 (\tan 45.73^\circ - \tan 25.84^\circ)] \text{ Mvar} \\ &= 7.1 \text{ Mvar} \end{aligned} \quad (3.12-25)$$

式中: Q_1 为无滤波补偿时的无功功率; Q_2 为有滤波补偿时的无功功率; φ_1 为补偿前的功率因数角, $\varphi_1 = \arccos 0.7 = 45.57^\circ$; φ_2 为补偿后的功率因数角, $\varphi_2 = \arccos 0.9 = 25.84^\circ$;

各滤波回路(三相)补偿功率分配

$$Q_h = \frac{I_h/h}{\Sigma I_h/h} Q_{com} \quad (3.12-26)$$

$$\Sigma \frac{I_h}{h} = \left(\frac{100.74}{5} + \frac{71.96}{7} + \frac{91.58}{11} + \frac{77.49}{13} \right) \text{ A} = 44.7 \text{ A}$$

$$Q_5 = \left(\frac{20.148}{44.7} \times 7.1 \right) \text{ Mvar} = 3.2 \text{ Mvar}$$

$$Q_7 = \left(\frac{10.28}{44.7} \times 7.1 \right) \text{ Mvar} = 1.63 \text{ Mvar}$$

$$Q_{11} = \left(\frac{8.325}{44.7} \times 7.1 \right) \text{ Mvar} = 1.32 \text{ Mvar}$$

$$Q_{13} = \left(\frac{5.96}{44.7} \times 7.1 \right) \text{ Mvar} = 0.95 \text{ Mvar}$$

各次回路的电容量计算: 选择电容器规格为100kvar, $6.6/\sqrt{3} \text{ kV}$, $21.92 \mu\text{F}$ 。每只电容的实际容量 = $\left(\frac{\text{每相电容承受电压}}{\text{电容额定电压}} \right)^2 \times \text{电容容量}$, 即 $\left(\frac{6300/\sqrt{3}}{6600/\sqrt{3}} \right)^2 \times 100 = 91 \text{ kvar}$ 。再选择滤波器各回路每相电容个数

$$N_k = \frac{Q_k}{3} \times \frac{1}{\text{每只电容实际容量}}$$

$$k=5 \text{ 时}, N_5 = \left(\frac{3.2}{3} \times \frac{10^3}{91} \right) \text{ 只} = 11.7 \text{ 只} \approx 12 \text{ 只}$$

$$k=7 \text{ 时}, N_7 = \left(\frac{1.63}{3} \times \frac{10^3}{91} \right) \text{ 只} = 5.9 \text{ 只} \approx 6 \text{ 只}$$

$$k=11 \text{ 时}, N_{11} = \left(\frac{1.32}{3} \times \frac{10^3}{91} \right) \text{ 只} = 4.8 \text{ 只} \approx 5 \text{ 只}$$

$$k=13 \text{ 时}, N_{13} = \left(\frac{0.95}{3} \times \frac{10^3}{91} \right) \text{ 只} = 3.4 \text{ 只} \approx 4 \text{ 只}$$

而知每相电容量为

$$C_5 = (12 \times 21.92) \mu\text{F} = 263.04 \mu\text{F}$$

$$C_7 = (6 \times 21.92) \mu\text{F} = 131.52 \mu\text{F}$$

$$C_{11} = (5 \times 21.92) \mu\text{F} = 109.6 \mu\text{F}$$

$$C_{13} = (3 \times 21.92) \mu\text{F} = 65.76 \mu\text{F}$$

各滤波回路电感计算的方法是假设电容升压相等法——

谐振时感抗和容抗之和为零, $j\omega L_h - j \frac{1}{\omega C_h} = 0$ 。得 $X_{Lh} = \frac{X_{Ch}}{h^2}$, 并可求得滤波器容抗为

$$X_{C5} = \left(\frac{1 \times 10^6}{314 \times 263.04} \right) \Omega = 12.1 \Omega$$

$$X_{C7} = \left(\frac{1 \times 10^6}{314 \times 131.52} \right) \Omega = 24.2 \Omega$$

$$X_{C11} = \left(\frac{1 \times 10^6}{314 \times 109.6} \right) \Omega = 29 \Omega$$

$$X_{C13} = \left(\frac{1 \times 10^6}{314 \times 65.76} \right) \Omega = 48.4 \Omega$$

各回路的感抗 X_{Lh} 为

$$X_{L5} = \left(\frac{12.1}{5^2} \right) \Omega = 0.48 \Omega$$

$$X_{L7} = \left(\frac{24.2}{7^2} \right) \Omega = 0.49 \Omega$$

$$X_{L11} = \left(\frac{29}{11^2} \right) \Omega = 0.24 \Omega$$

$$X_{L13} = \left(\frac{48.4}{13^2} \right) \Omega = 0.29 \Omega$$

各次回路每项的电感量为

$$L_h = \frac{X_{Lh}}{2\pi f} \quad (3.12-27)$$

$$L_5 = \left(\frac{0.48}{314} \right) \text{ mH} = 1.53 \text{ mH}$$

$$L_7 = \left(\frac{0.49}{314} \right) \text{ mH} = 1.56 \text{ mH}$$

$$L_{11} = \left(\frac{0.24}{314} \right) \text{ mH} = 0.76 \text{ mH}$$

$$L_{13} = \left(\frac{0.29}{314} \right) \text{ mH} = 0.92 \text{ mH}$$

附加在每相的电阻为

$$R_h = \frac{X_{Ch}}{\epsilon h} (\epsilon \text{ 为品质系数, 取 } 40)$$
$$R_5 = \left(\frac{12.1}{40 \times 5} \right) \Omega = 0.06 \Omega$$
$$R_7 = \left(\frac{24.2}{40 \times 7} \right) \Omega = 0.086 \Omega$$
$$R_{11} = \left(\frac{29}{40 \times 11} \right) \Omega = 0.066 \Omega$$
$$R_{13} = \left(\frac{48.4}{40 \times 13} \right) \Omega = 0.093 \Omega$$

滤波回路基波电流为

$$I_{L,7} = \left(\frac{6.3/\sqrt{3} \times 10^3}{24.2 - 0.49} \right) A = 153.6 A$$
$$I_{L,11} = \left(\frac{6.3/\sqrt{3} \times 10^3}{29 - 0.24} \right) A = 126.6 A$$
$$I_{L,5} = \left(\frac{6.3/\sqrt{3} \times 10^3}{12.1 - 0.48} \right) A = 313.4 A$$
$$I_{L,13} = \left(\frac{6.3/\sqrt{3} \times 10^3}{48.4 - 0.29} \right) A = 75.7 A$$

滤波回路实际基波补偿量校核：当电容及电感的容量参数已经选定，但由于实际上电参数的误差，导致补偿结果产生差异，为此需要对滤波回路实际基波补偿量进行校核

$$Q_{\text{comp},5} = [313.4^2 \times (12.1 - 0.48)] \text{kvar} = 1141.3 \text{kvar}$$
$$Q_{\text{comp},7} = [153.6^2 \times (24.2 - 0.49)] \text{kvar} = 559.389 \text{kvar}$$
$$Q_{\text{comp},11} = [126.6^2 \times (29 - 0.24)] \text{kvar} = 40.95 \text{kvar}$$
$$Q_{\text{comp},13} = [75.7^2 \times (48.4 - 0.29)] \text{kvar} = 275.69 \text{kvar}$$

2.3.2 带失谐电抗器无功功率及谐波补偿

2.3.2.1 带失谐电抗器无功功率及谐波补偿的应用

由于电网中除去无功的危害，还有大量的谐波。因此在许多场合，无功补偿设备兼作电网中的若干奇次倍频（主要为5、7、11、13、15、17等）的补偿，这是应用较广泛的无源补偿设备。其工作原理是谐振法，利用谐振现象将倍频奇次谐波滤除掉。在谐振法中，有一种控制办法是采用失谐的办法，利用失谐电抗器DR使电路工作于失谐状态，目的是防止电网中的谐波放大，不产生谐振，以保护电容器。使用失谐电抗器时必须使用配套的失谐电容器。

失谐电抗器有三种失谐频率，以满足不同电力系统需要（见表3.12-3）。

表 3.12-3 调谐频率、调谐次数 ($n=f_r/f$) 与阻抗比的关系

调谐频率 (Hz)	调谐次数 ($n=f_r/f$)	阻抗比 (%)
135	2.7	13.7
190	3.8	6.92
215	4.3	5.4

(1) 调谐频率的选择。调谐频率指的是装置出现的谐波频率，就是说它是系统出现的谐波频率，并且要做到调谐频率小于谐波频率的原则设计。例如，对应于3次谐波， $2.7 \times 50 = 135 < 150$ ；对应于5次谐波， $3.8 \times 50 = 190 < 250$ ；对应于7次谐波， $4.3 \times 50 = 215 < 350$ 。如有远方控制频率（多数是音频、控制信号沿输电线传输，属供电局使用），要与供电公司商议，是否影响控制信号的正确传输。

(2) 失谐电抗器的作用。失谐电抗器的作用是保护电容器，不使谐波放大。使用失谐电抗器可以吸收谐波电流，降低电网中的谐波。当失谐电抗器的频率接近谐波频率时改善效果更为显著。

失谐电抗器的频率选为215Hz时，比电抗器在190Hz或135Hz时吸收更多次谐波电流。失谐电抗器串联后会使得电容器两端的电压有所上升，要注意电容器电压的选择。此时电容器电压 U'_e 为

$$U'_e = (n^2/n^2 - 1)U_e \tag{3.12-28}$$

这时要提高电容电压至少为电源电压的 $n^2/n^2 - 1 (>1)$ 倍。例如，当 $n=3$ 时，则为9/8倍； $n=5$ 时，则为25/24倍； $n=7$ 时，则为49/48倍；如系统额定工作电压400V，则上述电压分别提高到450V、416V及408V。

2.3.2.2 失谐电抗器的设计

(1) 调谐频率选择。调谐频率 f_r 对应于回路的谐振频率 $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ （见图3.12-11）。还需考虑调谐次数 n ，对于电网50Hz时，为 $n = \frac{f_r}{50\text{Hz}}$ 。调谐次数选择必须保证谐波的次数范围在谐振频率之外（见图3.12-12），还要保证遥控频率不受干扰。现失谐电抗器主要用于调谐倍数3.8或4.3（2.7倍数用于滤除3次谐波，3.8倍数用于滤除5次谐波，4.3倍数用于滤除7次谐波）。

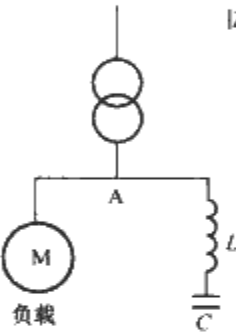


图 3.12-11 谐振示意图

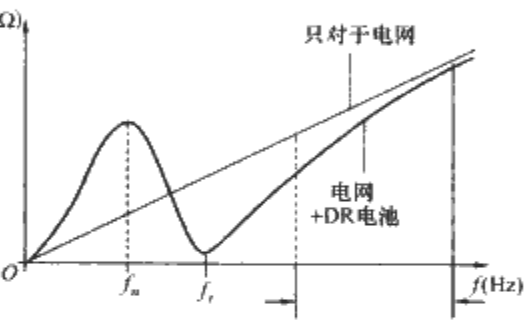


图 3.12-12 谐波频率范围示意图

(2) 谐波（失谐与谐振）滤波电抗器设计。这种电抗器主要用于有各种谐波源的交流线路中，用其与滤波电容串联后的谐振作用，形成谐振滤波器，滤除谐波电流，使电网电流接近正弦波。其物理原理是，谐振后对某一谐波频率电流呈现低阻抗特性，形成近似短路，达到滤除某次谐波电流的目的。滤波器有时为一组，对不同次数特征谐波谐振，滤除若干不同次数的谐波电流。在谐波电路中，流过的电流以谐波电流为主要成分，设计时要考虑谐波频率下的有效电阻的增加。单从电抗器角度看，滤波电抗是一只工作于谐波频率下的只有交流励磁的铁心电抗器。因此可采用铁心电抗器方法来设计、制造滤波电抗器。

1) 已知数据有电抗器的额定工作电压（即电抗器的电抗压降） U_N , V；工作频率 f_x 下的电抗值 X , Ω；电感量 L , H；额定工作电流 I_N , A；额定容量 S_N , kvar。

2) 基本关系式。

$$U_N = I_N X = 2\pi f_x L \tag{3.12-29}$$

$$S_N = U_N I_N \times 10^{-3} \tag{3.12-30}$$

3) 等值容量确定。通常，电抗器合理地有效材料重量比（铜—铁比）与一般变压器相同。对于中、小型电抗器，可先决定等值于双绕组变压器的等效容量，然后据此选铁心柱截面积。

$$\text{一般等效容量} = \frac{S_N}{K_B K_i}$$

式中： K_B 为电抗器选用的磁通密度与电力变压器惯用的磁通密度比； K_i 为电抗器选用的电流密度与电力变压器惯用的电流密度比。

有分接头的电抗器的等效容量为 $\sqrt{\frac{L_{max}}{L}} \frac{S_N}{2K_B K_i}$ ，其中 L_{max} 为所有匝数全部接入时的最大电感量。

4) 铁心和绕组。根据选定的铁心柱截面积和每匝电动势排列绕组。绕组和绝缘结构可按相应绝缘水平的电力变压器来考虑。

5) 间隙尺寸的计算。

a. 绕组漏磁演化截面积为

$$A_{\delta} = \frac{\pi d^2}{4} + \frac{\pi b D_{av}}{3} - \frac{A_z}{K_{dp}} \quad (\text{cm}^2) \quad (3.12-31)$$

式中： d 为绕组平均直径，cm； b 为绕组幅向厚度，cm； D_{av} 为绕组平均直径，cm； K_{dp} 铁心叠片系数。

b. 每相绕组由于铁心柱间隙以外的磁通（通常称为漏磁通）所感应的电压 U_x 为

$$U_x = \frac{7.9 f N^2 I_N A_{\delta}}{h_k N_z} \times 10^{-8} \quad (3.12-32)$$

式中： U_x 为感应电压，V； f 为电抗器工作频率，Hz； N 为每相匝数； I_N 为额定相电流，A； h_k 为每相绕组净高度，cm； N_z 为每相绕组分套在几个铁心柱上的数目，三相三柱式电抗器 N_z 取 1，单相双柱式 N_z 取 2。

c. 由铁心柱间隙中的磁通所感应的电压为

$$U_z = U_N - U_x$$

6) 电抗器每柱总间隙尺寸为

$$\sum \delta = n \delta = \frac{7.9 f N (I_N N) A_{\delta}}{U_z N_z} \times 10^{-8} \quad (3.12-33)$$

式中： n 为每柱间隙数，cm； δ 为每一间隙厚度，cm； A_{δ} 为考虑磁通扩散后间隙的有效面积。

a. 多级平行叠积式铁心饼。

$$A_{\delta} = \frac{A_z}{K_{dp}} + 2\epsilon(b + c + 2\epsilon)$$

b. 对幅射形（或渐开形）。

$$A_{\delta} = \frac{A_z}{K_{dp}} + \pi\epsilon(D + d) \quad (3.12-34)$$

式中： ϵ 为间隙每边扩大宽度。

$$\epsilon = 0.735 \delta + \lg \frac{h_b + \delta}{\delta} \quad (3.12-35)$$

式中： h_b 为每一铁心饼高度，cm。

7) 间隙厚度 δ 一般取 2~12mm，间隙厚度如太大，则磁通扩散严重，容易引起局部过热。铁心饼高度 h_b 一般取 35~100mm，依容量大小决定。

2.3.2.3 滤波装置中滤波电容选择

电容器与失谐电抗器串联后，电容器两端的电压有一定程度升高，所以必须注意电容器工作电压的选取，电容器组的工作电压 U_{Cg} 要比系统额定工作电压 U_N 大 $\frac{n^2}{n^2-1}$ 倍（其中的 n 为电抗器的调谐次数），即要求电容器工作电压比系统电压提高至少 $\frac{n^2}{n^2-1}$ 倍。

(1) 滤波装置对滤波电容的其他技术要求（见表 3.12-4）。

表 3.12-4 对电容器性能要求	
项目名称	性能要求
电容偏差	带通滤波器电容器应不超过±5% 高通滤波器电容器应不超过±7.5%
电容温度系数 T_{an}	不大于 $(3\sim5)\times10^{-4}K$ 膜纸复合介质电容器不大于 0.12% 全膜介质电容器不大于 0.05%

续表

项目名称	性能要求
电介质的电气强度	工频交流试验电压 $U_i=2.15U_{IN}+1.5\sum U_{hN}, 10s$ 直流试验电压 $U_i=4.3U_{IN}+3\sum U_{hN}, 10s$
箱壳耐爆能量	容量 50kvar 以下为 4kJ, 50~200kvar 为 8kJ, 200kvar 及以上为 12kJ

(2) 滤波电容的额定工作电压选择。设滤波支路的端电压 U_{Cg} 为

$$U_{Cg} = I_c X_{Cg} \frac{n^2}{n^2-1} = U_N A_{Cn} \quad (3.12-36)$$

其中，系数 $A_{Cn} = \frac{n^2}{n^2-1}$ 。

为防止电容器长期在谐振状况下的过压、再考虑留有电压储备系数 K_{Cv} 为

$$K_{Cv} = \frac{U_{Cg}}{U_N}$$

式中： U_{Cg} 为电容器额定电压； U_N 为电网母线额定电压。电容允许过载倍数 $C_{iv}=1.3$ ，电容允许过压倍数 $C_{uv}=1.05$ （若每昼夜工作不超过 6h，则可取 $K_{Cv}=1.1$ ）。最终给出电容电压选择式为

$$U_{Cg} = A_{Cn} K_{Cv} U_N \quad (3.12-37)$$

(3) 滤波电容器的过电流。滤波电容器的谐波电流要给予足够的注意。若电容量选择不当，会产生谐振使电容器损坏。可在电容支路中串入 2%~5% 的电抗器 L_s ，防止谐振（见图 3.12-13）。

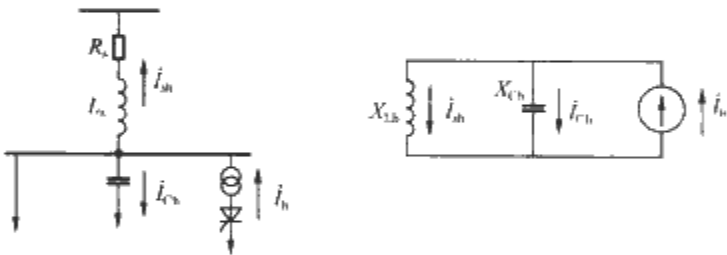


图 3.12-13 电容电流示意图

$$I_{ch} = \frac{X_{ch}}{X_{ch} X_{Lh}} I_h$$

2.3.3 谐波补偿装置

2.3.3.1 有源电力滤波器组成及原理

有源谐波补偿，所谓“有源”概指此类补偿器具有专门的电源供电，以区别前述改善与滤除谐波的各类滤波器（无源）。并且因为此类有源补偿器，可做到哪里有谐波造成的影响就在那里产生一相反的影响，予以抵消谐波的影响。有源电力滤波器由指令电流运算电路（控制电路）和补偿电流发生电路（主电路）两部分组成，指令电流运算电路的功能是检测出补偿对象中的谐波电流分量及无功电流分量。补偿电流发生电路的作用为根据指令电流运算电路得出的补偿电流的指令信号，产生实际的补偿电流。主电路多为 PWM 变流器。

检测补偿对象的电压和电流，经指令电流运算电路算得出补偿电流的指令信号，再经补偿电流发生电路输出补偿电流，将补偿电流与负载电流中要补偿的谐波和无功电流相抵消，最终得到期望的电源电流。例如：当有负载电流 i_L 及其谐波成分 i_{Lh} 时，可将 i_{Lh} 反极性后作为补偿电流的指令信号 i_c ，将 i_c 经主电路放大产生补偿电流 i_c （此时 i_c 与 i_{Lh} 大小相等、极性相反）并输往负载，二者互相抵消，电源电流 i_s 中只含基波，不含谐波。用表达式表示为，

$$\begin{aligned} i_s &= i_L + i_C \\ i_L &= i_{L1} + i_{Lh} \\ i_C &= -i_{Lh} \\ i_s &= i_L + i_C = i_{L1} \end{aligned}$$

式中： i_{L1} 为负载电流的基波分量。

2.3.3.2 有源谐波补偿分类

以补偿器与电源回路的联接方式分，可分为串联连接式、并联连接式、串并联连接式三大类。

有源滤波器是近代性能最优的电力补偿设备，已广泛用于电力网中。瞬时无功理论的提出，又是促使有源滤波器发展的主要因素之一。该理论的核心在于，突破了传统无功功率理论中用平均值来定义功率量的局限，它是传统功率理论的拓展。下面对各类有源滤波器作些说明。

(1) 单独使用的并联型有源电力滤波器。单独使用的并联型有源电力滤波器的组成如图 3.12-14 所示。

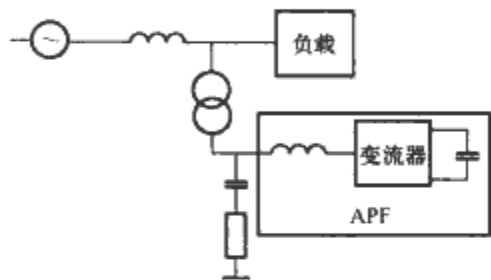


图 3.12-14 单独使用的并联型有源电力滤波器

图 3.12-14 中的负载为产生谐波的谐波源，由变流器和与其相联的电感及直流侧储能元件（本线路为电容）共同组成有源电力滤波器的主电路，与有源电力滤波器并联的小容量一阶高通滤波器（或采用二阶高通滤波器）是用于滤除有源电力滤波器所产生的补偿电流中开关频率附近的谐波。此有源电力滤波器主电路并联接入电网，故称并联型。又由于其补偿电流基本上由有源电力滤波器提供，为与其他方式相区别，称之为单独使用的并联型有源电力滤波器。其补偿功能有：

- 1) 只补偿谐波。
- 2) 只补偿无功功率。
- 3) 补偿三相不对称电流。
- 4) 补偿供电点的电压波动。
- 5) 以上各项任意组合。

(2) 与 LC 滤波器混合使用方式。如图 3.12-15 所示。其目的是降低有源滤波器的变流器容量，基本思想为利用 LC 滤波器来分担有源电力滤波器部分补偿任务，这样线路简单、成本低廉。图 3.12-29(a)中，有源滤波器和 LC 滤波器都接入电网，共同承担补偿任务。图 3.12-29(b)中 LC 滤波器包括多组单调谐滤波器，承担大部补偿谐波和无功的任务，有源滤波器只承担改善系统性能任务。

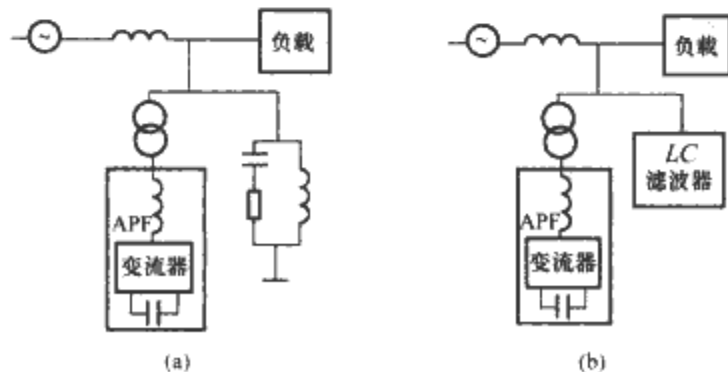


图 3.12-15 与 LC 滤波器混合并联使用有源电力滤波器

(3) 串联谐振注入方式如图 3.12-16 所示。

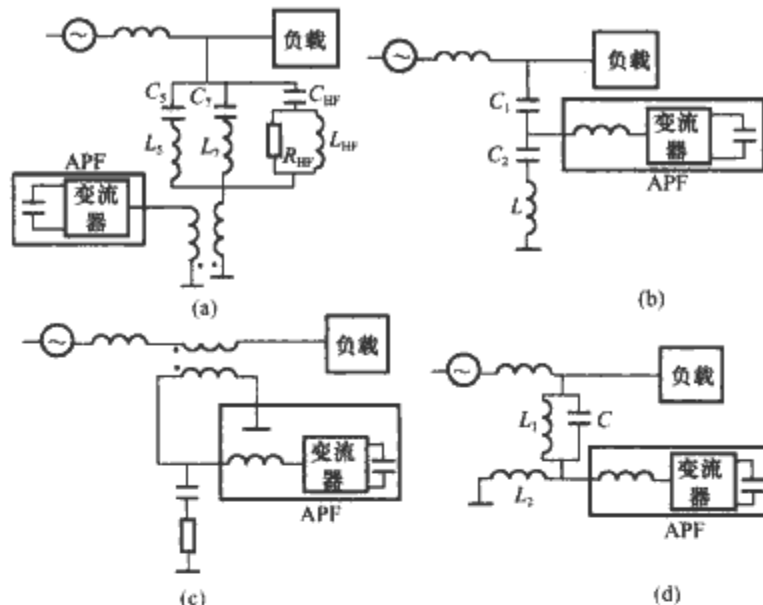


图 3.12-16 串联谐振注入方式

(a) 串联型与 LC 滤波器混合用；(b) 单独使用并联型；
(c) LC 串联谐振注入；(d) LC 并联谐振注入

3 瞬时无功功率理论

3.1 瞬时无功功率

瞬时无功功率理论是 20 世纪 80 年代才提出来的无功功率理论。它与多年来讨论与实践的无功功率及其补偿的古典理论平均无功功率有着天壤之别。这是因为电网中（无论是大电网、局部供电网、用户配电设备网、负载）的无功功率需求都在变化中，所以常用无功补偿设备、控制、投切电容器的依据，只能是在某一时间段内的无功功率需求的平均值。投入的电容器一步步接通，然后一步步切除，也是一个平均值。多年来都可满足需要，但它只是适用于正弦波电量，不能面对谐波。瞬时无功理论是对应用户对电网质量要求提高，谐波危害加重，及电力电子技术飞跃发展，向人们展现了有源电力滤波器、高频变换器，进而开创了电能补偿的新天地，至此瞬时无功理论应运而生。该理论的核心在于突破了传统功率理论中用平均值来定义功率量的局限，它是传统功率理论的拓展。

瞬时无功理论，最初以瞬时实功率 P 和瞬时虚功率 Q 的定义为基础，但没有定义出无功电流，它是建立在 P - Q 坐标系相平面上的矢量，亦称 P - Q 理论，讨论的是瞬时值。此后，人们逐渐发展了这一理论，并且利用矢量平面，给予了充分定义和解释。它的参量均为瞬时值，不仅适用于正弦波，也适用于非正弦波和调整的过渡过程。

假定三相市电的相电压和相电流的瞬时值分别为 \dot{e}_a 、 \dot{e}_b 、 \dot{e}_c 和 i_a 、 i_b 、 i_c 。为了分析方便，把它们用下面的变换式变换到 $\alpha\beta$ 两相正交坐标上，即

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_\alpha \\ \dot{e}_\beta \end{bmatrix} = \dot{c}_{32} \begin{bmatrix} \dot{e}_a \\ \dot{e}_b \\ \dot{e}_c \end{bmatrix} \quad (3.12-38)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \dot{c}_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.12-39)$$

$$\dot{c}_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.12-40)$$

在图 3.12-17 所示的 $\alpha\beta$ 平面上, 相量 \dot{e}_α 、 \dot{e}_β 和 \dot{i}_α 、 \dot{i}_β 分别可以称为 (旋转) 电压相量 \dot{e} 和电流相量 \dot{i}

$$\begin{aligned}\dot{e} &= \dot{e}_\alpha + \dot{e}_\beta = \dot{e} \angle \varphi_e \\ \dot{i} &= \dot{i}_\alpha + \dot{i}_\beta = \dot{i} \angle \varphi_i\end{aligned}\quad (3.12-41)$$

式中: e 、 i 分别为相量 \dot{e} 、 \dot{i} 的模, φ_e 、 φ_i 分别为相量 \dot{e} 、 \dot{i} 的幅角。

3.1.1 各种定义方法

3.1.1.1 定义 1

三相电路瞬时有功功率电流和无功功率电流分别定义为相量在相量及其法线上的投影, 即

$$\begin{aligned}i_P &= i \cos \varphi \\ i_Q &= i \sin \varphi\end{aligned}\quad (3.12-42)$$

式中: $\varphi = \varphi_e - \varphi_i$ 。

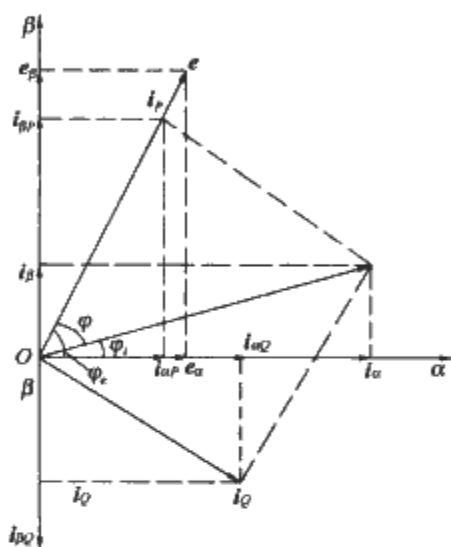


图 3.12-17 $\alpha\beta$ 两相坐标的电压和电流矢量

3.1.1.2 定义 2

三相电路瞬时无功功率 Q (瞬时有功功率 P) 为电压矢量 e 的模和三相电路瞬时无功电流 i_Q (三相电路瞬时有功电流 i_P) 的乘积, 即

$$\begin{aligned}P &= e i_P \\ Q &= e i_Q\end{aligned}\quad (3.12-43)$$

把式 (3.12-42) 所表达的定义 1 瞬时有功电流及瞬时无功电流代入式 (3.12-43) 中, 则得下列矩阵式

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & \cdots & e_\beta \\ e_\beta & \cdots & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = c_{PQ} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}\quad (3.12-44)$$

$$\text{式中: } c_{PQ} = \begin{bmatrix} e_\alpha & \cdots & e_\beta \\ e_\beta & \cdots & e_\alpha \end{bmatrix}\quad (3.12-45)$$

将式 (3.12-38)、式 (3.12-39) 再代入式 (3.12-45), 可以得出 P 、 Q 对三相电压, 电流的表达式

$$P = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c\quad (3.12-46)$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(e_b - e_c) i_a + (e_c - e_a) i_b + (e_a - e_b) i_c]\quad (3.12-47)$$

由式 (3.12-46) 可知三相电路的有功功率就是三相电路的瞬时有功功率。

3.1.1.3 定义 3

$\alpha\beta$ 相的瞬时无功电流 i_{aQ} 、 i_{bQ} (瞬时有功电流 i_{aP} 、 i_{bP}) 分别为三相电路瞬时无功电流 i_Q (瞬时有功电流 i_P) 在 $\alpha\beta$ 轴上的投影, 即

$$i_{aP} = i_P \cos \varphi_e = \frac{e_a}{e} i_P = \frac{e_a}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} P\quad (3.12-48)$$

$$i_{bP} = i_P \sin \varphi_e = \frac{e_\beta}{e} i_P = \frac{e_\beta}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} P\quad (3.12-49)$$

$$i_{aQ} = i_Q \sin \varphi_e = \frac{e_\beta}{e} i_Q = \frac{e_\beta}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} Q\quad (3.12-50)$$

$$i_{bQ} = -i_Q \cos \varphi_e = \frac{-e_a}{e} i_Q = \frac{-e_a}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} Q\quad (3.12-51)$$

从定义 3 可以得到以下性质:

$$(1) \quad i_{aP}^2 + i_{bP}^2 = i_P^2\quad (3.12-52)$$

$$i_{aQ}^2 + i_{bQ}^2 = i_Q^2\quad (3.12-53)$$

$$(2) \quad i_{aP} + i_{aQ} = i_a\quad (3.12-54)$$

$$i_{bP} + i_{bQ} = i_b\quad (3.12-55)$$

上述性质 (1) 是由 α 轴和 β 轴正交而产生的。

也可以把某一相的瞬时有功功率和瞬时无功功率分别称为瞬时电流的有功分量和无功分量。

3.1.1.4 定义 4

$\alpha\beta$ 相的瞬时无功功率 Q_α 、 Q_β (瞬时有功功率 P_α 、 P_β) 分别为该相瞬时电压瞬时无功电流 (瞬时有功电流) 的乘积, 即

$$P_\alpha = e_\alpha i_{aP} = \frac{e_\alpha^2}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} P\quad (3.12-56)$$

$$P_\beta = e_\beta i_{bP} = \frac{e_\beta^2}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} P\quad (3.12-57)$$

$$Q_\alpha = e_\alpha i_{aQ} = \frac{e_\alpha^2}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} Q\quad (3.12-58)$$

$$Q_\beta = e_\beta i_{bQ} = \frac{-e_\beta^2}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} Q\quad (3.12-59)$$

从定义 4 可以得到以下性质

$$P_\alpha + P_\beta = P\quad (3.12-60)$$

$$Q_\alpha + Q_\beta = 0\quad (3.12-61)$$

3.1.1.5 定义 5

三相电路的各相瞬时无功电流 i_{aQ} 、 i_{bQ} 、 i_{cQ} (瞬时有功电流 i_{aP} 、 i_{bP} 、 i_{cP}) 是 α 、 β 两相瞬时无功电流 i_{aQ} 、 i_{bQ} (瞬时有功电流 i_{aP} 、 i_{bP}) 通过两相到三相变换所得到的结果, 即

$$\begin{bmatrix} i_{aP} \\ i_{bP} \\ i_{cP} \end{bmatrix} = c_{32} \begin{bmatrix} i_{aP} \\ i_{bP} \end{bmatrix}\quad (3.12-62)$$

$$\begin{bmatrix} i_{aQ} \\ i_{bQ} \\ i_{cQ} \end{bmatrix} = c_{32} \begin{bmatrix} i_{aQ} \\ i_{bQ} \end{bmatrix}\quad (3.12-63)$$

$$c_{32} = c_{32}^T$$

将式 (3.12-48) ~ 式 (3.12-51) 代入式 (3.12-62)、式 (3.12-63) 中, 得到

$$i_{aP} = 3e_a \frac{P}{A}$$

$$i_{bP} = 3e_b \frac{P}{A}\quad (3.12-64)$$

$$i_{cP} = 3e_c \frac{P}{A}$$

$$i_{aQ} = (e_b - e_c) \frac{Q}{A}$$

$$i_{bQ} = (e_c - e_a) \frac{Q}{A}\quad (3.12-65)$$

$$i_{cQ} = (e_a - e_b) \frac{Q}{A}$$

$$A = (e_a - e_b)^2 + (e_b - e_c)^2 + (e_c - e_a)^2$$

$$= 2(e_a^2 + e_b^2 + e_c^2 - e_a e_b - e_b e_c - e_c e_a)\quad (3.12-66)$$

以上各式可以得到以下性质:

$$(1) \quad \left. \begin{aligned} i_{aP} + i_{bP} + i_{cP} &= 0 \\ i_{aQ} + i_{bQ} + i_{cQ} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.12-67)$$

$$(2) \quad \left. \begin{aligned} i_{aP} + i_{aQ} &= i_a \\ i_{bP} + i_{bQ} + i_b &= 0 \\ i_{cP} + i_{cQ} &= i_c \end{aligned} \right\} \quad (3.12-68)$$

上述两个性质分别和定义3的性质(1)和(2)相对应。定义3的性质(1)反映了a相和b相的正交性，而这里的性质(1)则反映了a, b, c三相对称性。

3.1.1.6 定义6

a、b、c各相的瞬时无功功率 Q_a, Q_b, Q_c （瞬时有功功率 P_a, P_b, P_c ）分别为该相瞬时电压和瞬时无功电流（瞬时有功电流）的乘积，即

$$\left. \begin{aligned} P_a &= e_a i_{aP} = 3e_a^2 \frac{P}{A} \\ P_b &= e_b i_{bP} = 3e_b^2 \frac{P}{A} \\ P_c &= e_c i_{cP} = 3e_c^2 \frac{P}{A} \end{aligned} \right\} \quad (3.12-69)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_a &= e_a i_{aQ} = e_a (e_b - e_c) \frac{Q}{A} \\ Q_b &= e_b i_{bQ} = e_b (e_c - e_a) \frac{Q}{A} \\ Q_c &= e_c i_{cQ} = e_c (e_a - e_b) \frac{Q}{A} \end{aligned} \right\} \quad (3.12-70)$$

定义6也有和定义4类似的性质：

$$\left. \begin{aligned} P_a + P_b + P_c &= P \\ Q_a + Q_b + Q_c &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.12-71)$$

传统理论中的有功功率，无功功率都是在平均值基础上或相量的意义上定义的，它们只适用于电压电流都是正弦波的情况。而瞬时无功理论的概念都是在瞬时值基础上定义的。因此它不仅适用于正弦波，也适用于非正弦波和任何过渡过程。是传统理论的推广和发展。瞬时无功理论包括传统无功功率理论，但比传统无功功率理论有更大的适用范围。根据上述的瞬时无功功率理论，可以得出进行谐波补偿，无功补偿，电能质量补偿等时的指令值检测方法，也就是P-Q法和 i_P-i_Q 法。

3.2 电压电流的瞬时值波形与检测

3.2.1 基本要求

要实现交流电压和电流的瞬时值波形比较，必须具备两个条件：①比较量和被比较量的频率必须相同，相位必须一致；②必须有一个高质量的标准正弦波电压作为比较参考。为此采用一种与市电电压同步的锁相“基准交流正弦波电压发生器”，作为标准正弦电压和电流的参考波形它们的精度应至少达到±0.02%，失真度小于0.5%。

3.2.2 对市电电压的瞬时值波形比较

波形比较原理分两种情况：

(1) 当市电电压为正弦波时， $U = U_m \sin \omega t$ 。市电电压与基准正弦波电压 U 进行比较，以检出市电电压的波动值，当 $U > U_r$ 或 $U < U_r$ 时，被检出市电电压波动值为

$$U - U_r = U_m \sin \omega t - U_{mr} \sin \omega t = (U_m - U_{mr}) \sin \omega t \quad (3.12-72)$$

再用 $U_m - U_{mr}$ 为指令值 U_c ，对设备进行控制，使市电得到负、正补偿。

(2) 当市电电压含有谐波时

$$U = U_m \sin \omega t + \sum U_{mh} \sin h \omega t$$

如果 $U > U_r$ 或 $U < U_r$ 时市电电压波动值和谐波为

$$U - U_r = (U_m - U_{mr}) \sin \omega t - \sum U_{mh} \sin h \omega t \quad (3.12-73)$$

3.2.3 瞬时无功理论检测法

3.2.3.1 P—Q法：用P—Q法检测瞬时无功功率电量的框图见图3.12-18。此法根据定义算出P、Q，经过低通滤波器LPF得到P、Q的直流分量 \bar{P} 、 \bar{Q} 。当被检测电量无畸变时， \bar{P} 为基波有功电流与电压的作用产生。 \bar{Q} 为基波无功电流与电压的作用产生。于是由 \bar{P} 、 \bar{Q} 就可以检测出电流 i_a, i_b, i_c 的基波分量 i_{af}, i_{bf}, i_{cf} 。

$$\begin{bmatrix} i_{af} \\ i_{bf} \\ i_{cf} \end{bmatrix} = c_{32} c_{PQ}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{P} \\ \bar{Q} \end{bmatrix} = \frac{1}{e^2} c_{32} c_{PQ} \begin{bmatrix} \bar{P} \\ \bar{Q} \end{bmatrix} \quad (3.12-74)$$

将 i_{af}, i_{bf}, i_{cf} 与 i_a, i_b, i_c 相减，即可得到 i_a, i_b, i_c 中的谐波分量 i_{ah}, i_{bh}, i_{ch} 。

当此法用于有源谐波滤波器，同时检测无功电流和谐波电流时，只需断开图3.12-18中的 \bar{Q} 通道即可。这时，由 \bar{P} 即可检出电流 i_a, i_b, i_c 中的基波有功分量 $i_{aPf}, i_{bPf}, i_{cPf}$ 为

$$\begin{bmatrix} i_{aPf} \\ i_{bPf} \\ i_{cPf} \end{bmatrix} = c_{32} c_{PQ}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{P} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.12-75)$$

将 $i_{aPf}, i_{bPf}, i_{cPf}$ 与 i_a, i_b, i_c 相减，即可得出 i_a, i_b, i_c 中的基波无功分量和谐波分量之和 i_{ad}, i_{bd}, i_{cd} 。下脚标中的d表示由检测电路检测出来的结果。

由于在电路中采用了低通滤波器LPF，故需经过一定的延时才能测得准确的 \bar{P} 、 \bar{Q} 。但当只测无功电流时，则不需低通滤波器，只需直接将 \bar{Q} 反变换即可得出无功电流为

$$\begin{bmatrix} i_{aQ} \\ i_{bQ} \\ i_{cQ} \end{bmatrix} = \frac{1}{e^2} c_{32} c_{PQ} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{Q} \end{bmatrix} \quad (3.12-76)$$

对于三相三线制电路，只要电源电路波形发生畸变，不论三相电压，电流是否对称，用P—Q法检测的结果有误差，只是误差情况有所不同。

3.2.3.2 i_P-i_Q 法

用 i_P-i_Q 法检测瞬时无功功率电量的框图如图3.12-19所示，图中的c为

$$c = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix} \quad (3.12-77)$$

在此法中需要用到与A相电源电压同相位的正弦信号 $\sin \omega t$ 和对应的余弦信号 $-\cos \omega t$ ，它由一个锁相环PLL和一个正、余弦信号发生器得到。根据定义可以计算出 i_P, i_Q 经低通滤波器LPF经滤波后得出 \bar{i}_P, \bar{i}_Q 的直流分量 \bar{i}_P, \bar{i}_Q 。这里 \bar{i}_P, \bar{i}_Q 是由 i_{af}, i_{bf}, i_{cf} 产生的，因此，由 \bar{i}_P, \bar{i}_Q 即可计算出 i_{af}, i_{bf}, i_{cf} ，进而计算出谐波分量 i_{ah}, i_{bh}, i_{ch} 。

与P-Q法相同，当要检测无功电流和谐波流之和时，断开图3.12-19中的 \bar{Q} 通道即可（图中的开关S）。如果只须检测无功电流，则只对 \bar{i}_Q 进行反变换即可。需指出的是，由于 i_P-i_Q 法只取 $\sin \omega t, -\cos \omega t$ 参与运算，在运算过程中电源畸变电压的谐波分量并不出现，因而检测结果不受电源电压畸变的影响。

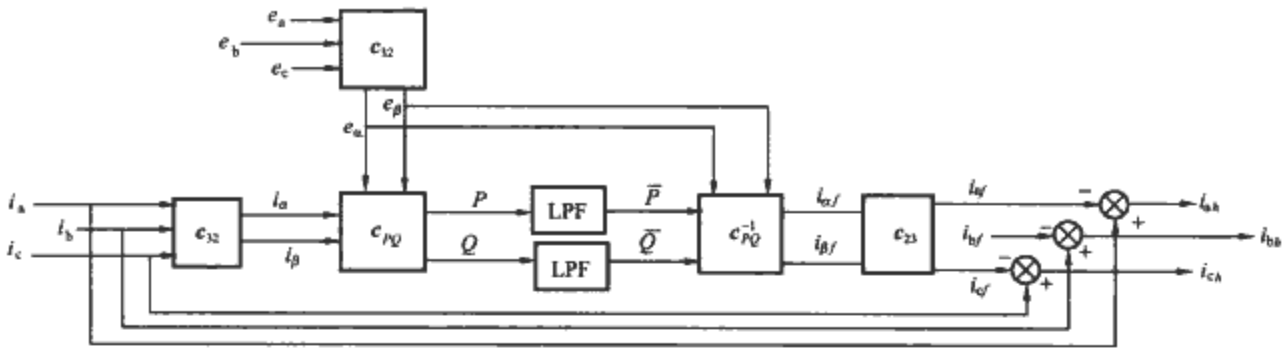


图 3.12-18 用 P - Q 法检测瞬时无功功率电量的框图

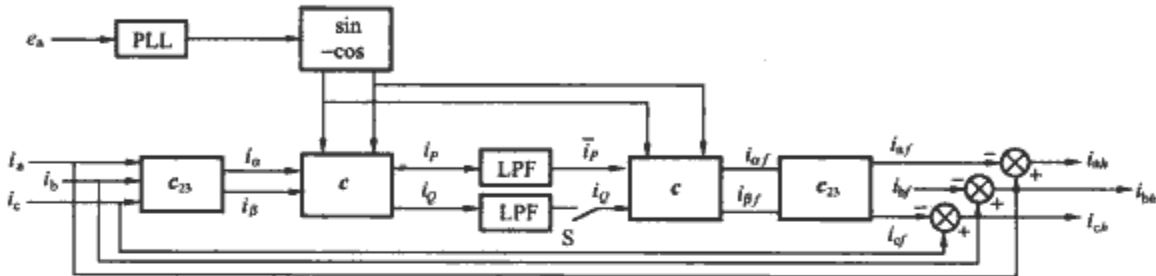


图 3.12-19 用 i_P - i_Q 法检测瞬时无功功率电量的框图

第 13 章 电 缆 桥 架

1 简述

电缆桥架是低压成套开关设备的重要组成部分。它也是低压电力电网中的必不可少的组成部分。它的定义是：由托盘及梯架的直线段、弯通、组件以及托臂（臂式支架），吊架和其他系统元件等构成具有支撑电缆和的刚性结构系统的全称。电缆桥架的主要技术要求依据 IEC 61537—2005 和 JB/T 10216—2000 《电控配电用电缆桥架》。

2 使用条件

2.1 正常使用条件

- (1) 安装地点的海拔不超过 2000m。
- (2) 气候等级的规定（见表 3.13-1）：分为 3K5L、3K6、3K6L、4K2 四种。

表 3.13-1 气候等级分类

环境参数	等 级			
	3K5L	3K6	3K6L	4K2
低温（℃）	—5	—20		—35
高温（℃）	+40	+55	+40	+40
低相对湿度（%）	5	10		10
高相对湿度（%）	95	100		100
凝露条件	有	有		有
降水条件（mm/min）	—	—		6
结冰条件	—	有		有

对于 3K5L 和 3K6 等级环境高温分别为 +45℃ 和 55℃ 的规定，在不存在日光照射时可采用 +40℃（第三位代号 L 表示部分指标可以低于规定值）。

- (3) 对防护类别及使用环境要求见表 3.13-2。

表 3.13-2 防护类别及使用环境

防护类别	防护类型代号	使用环境条件等级
普通型	J	3K5L, 3K6, 3K6L
湿热型	TH	3K5L, 3C2
防中等腐蚀型	F1	3K5L, 3C3
防强腐蚀型	F2	3K5L, 3C4
户外型	W	4K3, 4C2
耐火型	N1~N3 ^①	在消防线路中

① N1~N3 为耐火等级代号。

2.2 特殊使用条件

- (1) 敷设在不同化学腐蚀环境中，其分类见表 3.13-3。

表 3.13-3 化学腐蚀环境分类 mg/m³						
环境参数 ^①	等 级					
	3C2, 4C2		3C3		3C4	
	平均值 ^②	最大值 ^②	平均值 ^②	最大值 ^②	平均值 ^②	最大值 ^②
盐雾	有盐雾条件 ^③					
硫化氢	0.1	0.5	3.0	1.0	14	70
氯	0.1	0.3	0.3	1.0	0.6	3.0
氯化氢	0.1	0.3	1.0	5.0	3.0	15
氟化氢	0.01	0.03	0.05	1.0	0.1	2.0
氨	1.0	3.0	10	35	35	175
臭氧	0.05	0.1	0.1	0.3	0.2	2.0
氧化氮 ^④	0.5	1.0	3.0	9.0	10	20

① 在环境参数中，有一种或一种以上的化学气体浓度符合本表规定，限属于该等级。
② 平均值是长期数值的平均，最大值是在每天不超过 30min 期间的极限值或峰值，如超过 30min 则应提高等级。
③ 有盐雾条件只作定性规定，不用划分等级。
④ 相当于二氧化氮。

- (2) 敷设消防电路。
- (3) 敷设在海拔 2000m 以上，由用户与制造商协商确定。

3 主要技术性能

主要技术性能要求的依据是 IEC 61537—2005 和 JB/T 10216—2000 《电控配电用电缆桥架》。它分为机械要求（包括结构要求、材料要求）、电气要求、表面防护要求、耐火要求。

3.1 结构材料要求

- (1) 钢制托盘、梯架、附件采用冷轧板，铝制托盘、梯架及附件应符合 GB/T 3880 《铝及铝合金轧制板材》规定。
- (2) 玻璃钢最高托盘、梯架、及附件，其材料应符合 GB/T 15568 《通用型片状模塑料（SMC）》的规定。
- (3) 螺栓、螺母、平垫、弹垫及半圆头方径螺栓应分别符合 GB/T 5780 《六角头螺栓 C 级》和 GB/T 6170 《六角螺母 A 级和 B 级》等的规定。
- (4) 耐火桥架中直接与带电电缆杰出的非金属材料应符合 GB/T 8624—B1 《建筑材料燃烧性能分级方法》的规定。

- (5) 桥架的常用规格尺寸（见表 3.13-4）板材厚度（见表 3.13-5）。
- (6) 焊接质量、表面防护层要求（见表 3.13-6、表 3.13-7）。
- (7) 玻璃钢桥架的要求。表面要求平正，无划痕、裂纹，有一定的耐水性，防腐蚀性性能要求（见表 3.13-1，表 3.13-8）。

表 3.13-4 常用规格尺寸 mm				
宽度 B	高 度 H			
	50	100	150	200
100	△	△		
150		△		
200		△	△	
300		△	△	△
400		△	△	△
500		△	△	△
600		△	△	△
800			△	△

表 3.13-5 钢制托盘梯架允许最小板厚 mm	
托盘、梯架宽度 B	允许最小板厚 H
$B < 100$	1
$100 \leq B < 150$	1.2
$150 \leq B < 400$	1.5
$400 \leq B < 800$	2
$B \geq 800$	2.5

表 3.13-6 表面防护层要求 μm						
表面防护层种类		热浸镀锌	电镀锌	热固性粉末静电喷涂	喷漆	防火涂料
表面防护层厚度	桥架结构	≥65	≥12	≥60	≥50	≥500
	紧固件	M10 的为 20 M10~M20 的为 35 ≥M20 的为 45	≤M6 的 ≥6 M8~M12 的 ≥9 ≥M14 的 ≥12	—	—	—
附着力		镀层不应有剥离、起皮、凸起等现象	镀层不应有剥离、起皮、凸起等现象	应不低于 GB/T 1720—1993《漆膜附着力测定法》中 2 级的规定		应不低于 GB/T 1720—1993 中 3 级的规定
均匀性		浸镀层应不露出金属基体	其表面最薄镀层厚度不得低于总厚度的 80%，且不应超过 20% 的测试点	涂层表面没有明显的层次感		其表面最薄层厚度不得低于总厚度的 80%，且不应超过 20% 的测试点
外 观		镀层表面应无毛刺、均匀、挂灰、伤痕等缺陷，直径小于 2mm 的漏镀点不得超过 3 个，且在任一 100cm ² 的面积内不得有 2 个漏镀点	镀层表面应光滑、均匀、致密、不得有起皮、气泡、花斑、局部未镀、伤痕等缺陷	镀层表面应光滑、均匀、平整、无裂纹、无起皮、无气泡和水泡		从某一距离去观察，在有效表面上应没有肉眼可观察到的缺陷

注 1. 镀锌后再喷涂粉末或喷漆的复合防腐处理桥架，应分层符合表中相应防护层的具体规定。
2. 电镀锌或热浸镀锌，镀层合格后方可进行喷涂粉末或喷漆。

表 3.13-7 各种防护涂（镀）层的性能试验			
实验项目		试 验 方 法	结果判定
表面防护层厚度	镀 层	按 GB 4956《磁性金属机体上非磁性覆盖层厚度测量磁性方法》规定的试验方法	符合企业技术条件的要求
	涂 层	按 GB/T 1764《漆膜厚度测定法》规定的试验方法	
	阳极氧化膜	按 GB/T 8013《铝及铝合金阳极氧化 阳极氧化膜的总规范》规定的试验方法	
附着力	镀锌层	按 GB/T 5720《金属机体上的金属覆盖层（电沉积层和化学沉积层）附着强度试验方法》规定的试验方法	
	涂 层	按 GB/T 1720 规定的试验方法	
均匀性	热浸镀锌	按 GB/T 6743《户内、户外钢制电缆桥架防腐环境技术要求》规定的试验方法	
	镀锌层	采用测厚仪测试	
	涂 层	目测按 GB 4956 规定的试验方法	
	阳极氧化膜	按 GB/T 8013 规定的试验方法	

表 3.13-8 玻璃钢及其他非金属桥架的性能要求				
试验项目	试验方法	试验介质	周 期	试验结果
火焰试验	将样品放在长方形的金属壳体内，此壳体的一个面是敞开的，夹紧样品两端，使其在施加火焰的条件下可以放进或取出。壳体内部底面应覆上一块松木板，厚度约 10mm，外边用强度为 12~30g/m ² 的单层棉纸包住，样品长度为 675mm±10mm	在 23℃、0.1MPa 的条件下以 650mL/min±30mL/min 的流速供给纯度大于 98% 的丙烷气体；在 23℃、0.1MPa 的条件下以 10mL/min±0.5mL/min 的流速供给空气。火焰尺寸：蓝色焰芯高度 50mm；总高度 170mm	样品应接受 60s±2s 的火焰燃烧	1. 样品没有着火 2. 样品如果着火了，但满足了下述三个条件 (1) 移开试验火焰 30s 之内，火熄灭 (2) 棉纸没燃烧或木板没烤焦 (3) 在距上夹持件底边 50mm 内和距下夹持件顶边 50mm 内没有明显的着火和炼焦的痕迹

续表

试验项目	试验方法	试验介质	周 期	试验结果
耐水试验	按 GB/T 2575 的规定进行	23℃±2℃蒸馏水	14d	弯曲强度 120MPa
耐化学腐蚀性能	按 GB/T 3857 的规定进行	硫酸, 30% 盐酸, 5% 丙酮, 氨水等加配蒸馏水必须两种介质以上	14d	弯曲强度 120MPa
工频电气强度	按 GB/T 1408 的规定进行	电极 为黄铜	—	击穿电压 16kV
表面电阻率	按 GB/T1410 的规定进行	电极	电化时间 1min	≥10 ⁸ Ω
体积电阻率	按 GB/T 1410 的规定进行	电极	电化时间 1min	≥10 ⁷ Ω·cm

3.2 主要机械性能

主要机械性能是应能承受一定均匀负载载荷（见表 3.13-9）。

表 3.13-9 典型电缆桥架载荷表

材 料	支吊架跨距 (mm)	额定均布负荷 (N/m)			挠度值 (不大于)
		边高 100mm	边高 150mm	边高 200mm	
铜	2000	1000	1850	3100	10mm
玻璃钢		550	1100	1750	
铝		800	1450	2450	6mm

注 其他支架跨距的额定均布负荷由制造厂在技术条件中给出。

3.3 主要电气性能

主要电气性能是：保护电路的连续性，绝缘性能，表面电阻率大于或等于 1×10⁸Ω·cm，体积电阻率大于或等于 1×10⁷Ω·cm，工频电气强度等。

3.3.1 表面电阻率

表面电阻率是用实验的方法得到的数据。可按 IEC 60093 规定的仪器和方法在拭干的试品上进行试验。

- (1) 施加的电压除以电流。
- (2) 从测量仪器上之直接读数。
- (3) 用测量仪器提供的数据进行计算，公式为

表面电阻率= $\frac{2\pi R}{\ln \frac{D_1}{D_2}}$

式中：D₁ 为外部电极的内径，m；D₂ 为外部电极的外径，m；R 为电极之间的表面电阻，Ω。

表面电阻率是经三次试验的结果的几何平均数。

3.3.2 体积电阻率

应采用 IEC 60093 规定的仪器和方法，用电流计或电阻率计进行测量，根据所用仪器，用下述方法只获得表面电阻率 R。

- (1) 施加的电压除以电流。
- (2) 从测量仪器上之直接读数。
- (3) 用测量仪器提供的数据进行计算，公式为

体积电阻率= $\frac{\pi}{40} (D_1 + 5)^2 \frac{R}{T}$

式中：D₁ 为防护电极的内径，mm；T 为试品的厚度，mm；R 为试品的体积电阻，Ω。

体积电阻率是三次试验的结果的几何平均数。

3.3.3 保护接地(PE)功能

带有电气连续性和保护接地特性的金属电缆托盘系统和

电缆梯架系统，交流短路耐受电流从以下数列中选择：6kA，8kA，10kA，12.5kA，16kA，20kA，25kA。优选时间为 1s，但不小于 0.2s，当耐受时间小于 1s 时应由制造商或销售商说明。

根据短路耐受电流数列进行的系统分类，其对应的铜导体、PVC 绝缘电缆的截面积分别为：50mm²、70mm²、95mm²、120mm²、150mm²、185mm²、240mm²。

如果电缆托盘系统和电缆梯架系统的用处有要求，它们应具有良好的电气连续性，以保证等电位连接和接地。跨接点电阻应不超过 50mΩ，无跨接点电阻不超过每米 5mΩ。

3.4 耐火要求

耐火要求的等级见表 3.13-10。

表 3.13-10 耐火电缆桥架的耐火等级及代号

耐火等级代号	N1	N2	N3
维持工作时间(min)	≥30	≥45	≥60

4 产品介绍

电缆桥架产品主要包括梯级式电缆桥架、槽型电缆桥架、托盘式电缆桥架、组合式电缆桥架、耐火电缆桥架、玻璃钢电缆桥架。

4.1 梯型电缆桥架

梯型电缆桥架重量轻，成本低，安装方便，散热、透气性好，特别适用于高、低压电缆的敷设。梯型电缆桥架及附件如图 3.13-1 所示。

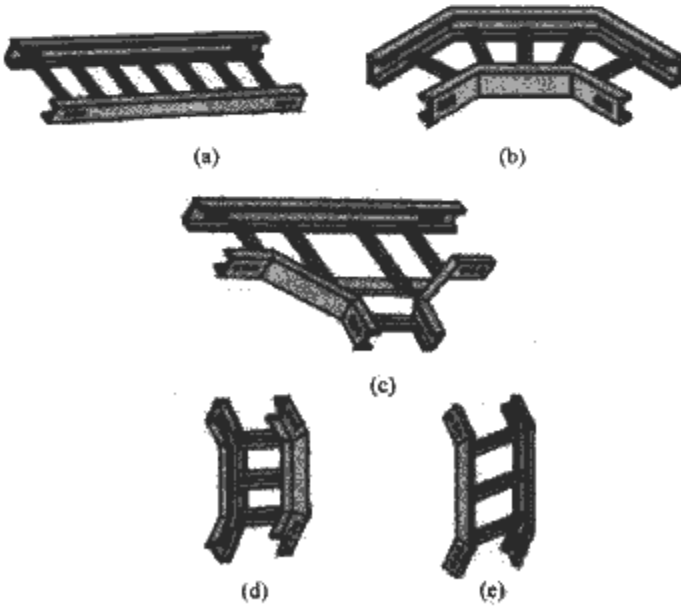


图 3.13-1 梯型电缆桥架及附件

- (a) 梯级式直通桥架；(b) 梯级式水平弯通；(c) 梯级式水平三通；(d) 梯级式垂直上弯通；(e) 梯级式垂直下弯通

4.2 槽型电缆桥架

槽型电缆桥架是一种全封闭型电缆桥架，它适用于敷设计算机电缆、通信电缆、热电偶电缆及其他控制电缆等，它对控制电缆的屏蔽干扰和重腐蚀环境中电缆的防护都有较好效果。槽型电缆桥架及附件如图 3.13-2 所示。

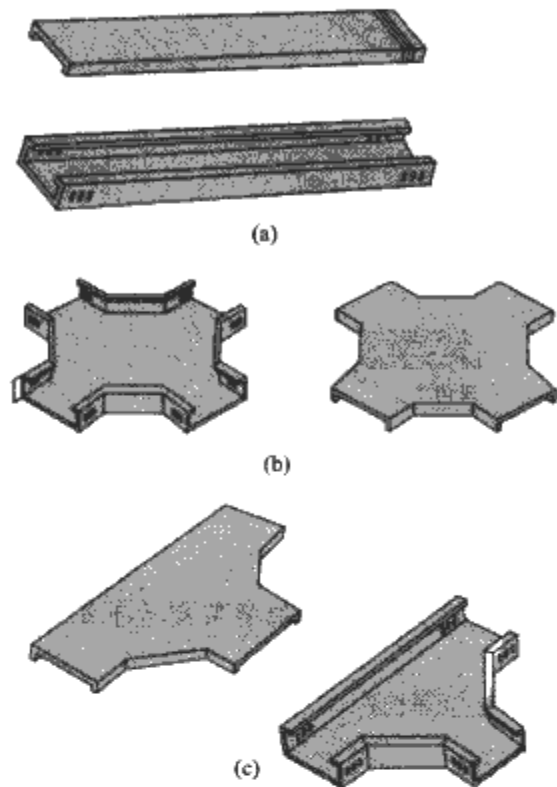


图 3.13-2 槽型电缆桥架及附件
(a) 槽式直通桥架；(b) 水平等径四通；
(c) 水平等径三通

4.3 托盘式桥架

托盘式桥架载荷大，造型美观、结构简单、安装方便等特点。托盘式桥架及附件如图 3.13-3 所示。

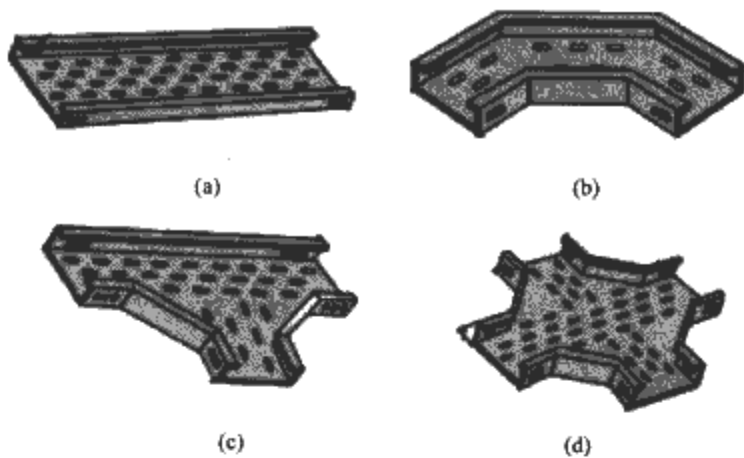


图 3.13-3 托盘式桥架及附件
(a) 托盘式直通桥架；(b) 托盘式水平弯通；
(c) 水平三通；(d) 水平四通

4.4 组合式电缆桥架

组合式电缆桥架是一种最新型桥架，它具有结构简单，配置灵活、安装方便、形式新颖等优点。它不需生产弯通、三通等配件，就可根据安装需要任意转向、变宽、分支、引上、引下。在任意部位，不需要打孔，焊接就可用管引出。组合式电缆桥架及附件如图 3.13-4 所示。

4.5 耐火电缆桥架

耐火电缆桥架主要由防尘罩、特殊材料支撑、硅酸铝岩棉、防火板 4 部分组成。耐火电缆桥架侧板采用成型机一次性拉制成型，增强了桥架的整体抗弯程度，侧板和底板采用最先进的 TOX 铆接技术，自动检测铆接点的质量。外表面喷有防火漆，能有效的隔绝空气，达到隔热效果，内侧垫加硅酸铝岩棉盒和防火板阻止热量的传导，耐火桥架配有防尘罩，用特殊材料支撑，当发生火灾时，防尘罩脱落封死护罩上的所有的散热孔，达到防火效果。耐火电缆桥架及附件如图 3.13-5 所示。

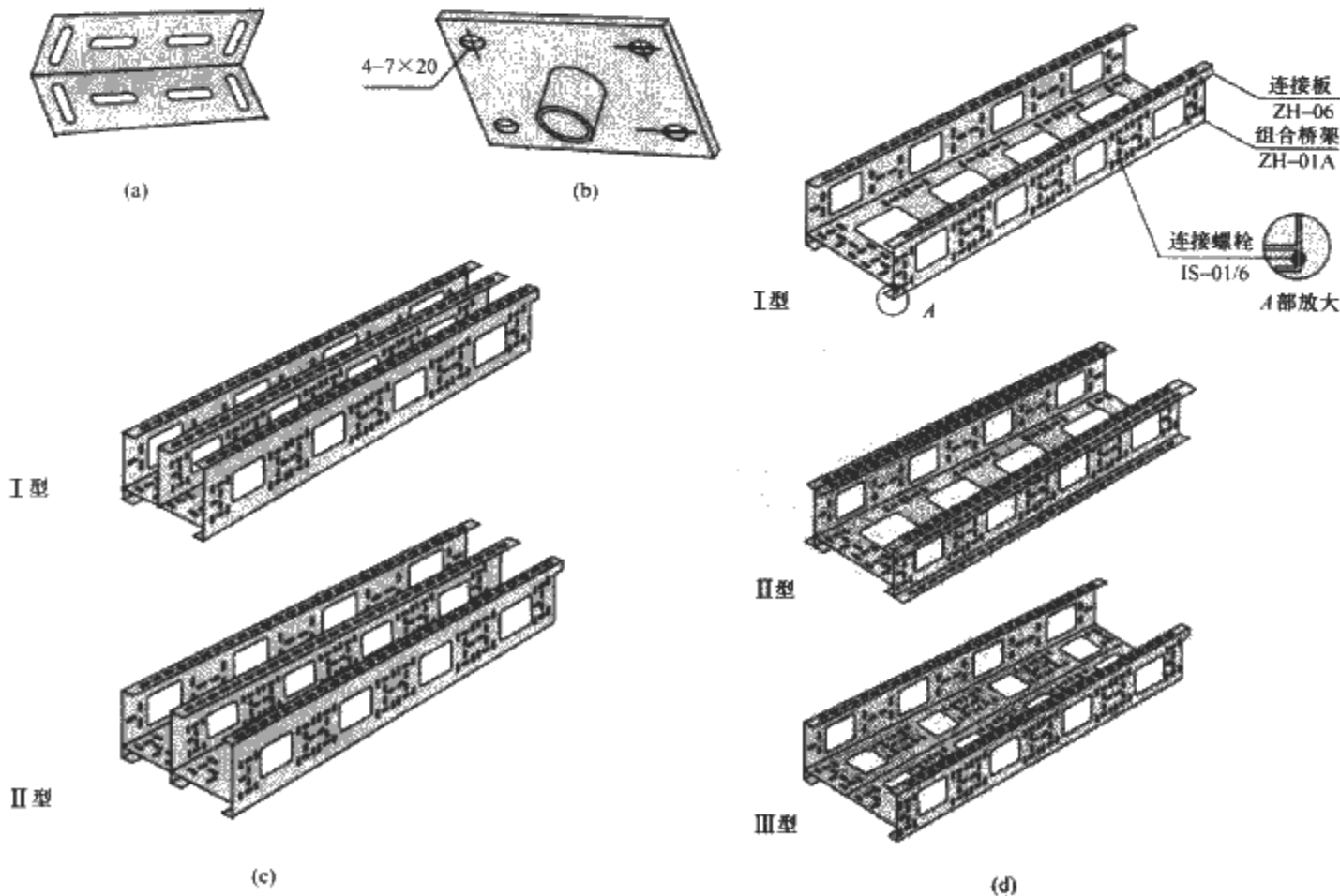


图 3.13-4 组合式电缆桥架及附件
(a) 连接板；(b) 管接头；(c) 组合式电缆桥架；(d) 组合式直通桥架

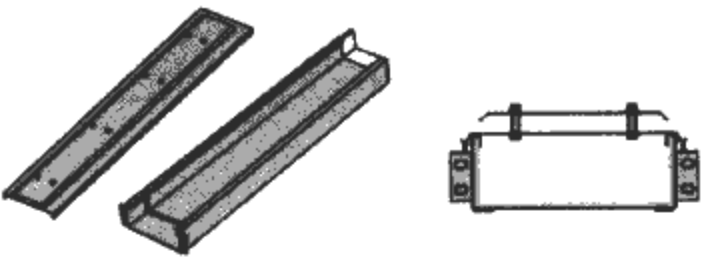


图 3.13-5 耐火电缆桥架

4.6 玻璃钢电缆桥架

玻璃钢桥架采用不饱和聚酯树脂和中碱无捻粗纱通过加热的模具拉制成型，具有外形美观，组织结构致密等优点；树脂中添加光稳定剂和阻燃剂，提高桥架的抗老化性能和阻燃性能。玻璃钢电缆桥架如图 3.13-6 所示。

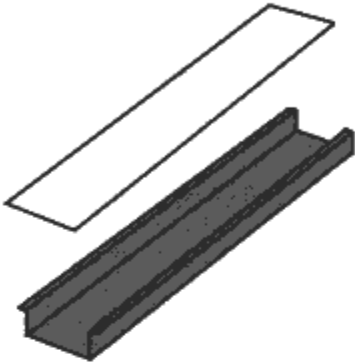


图 3.13-6 玻璃钢
电缆桥架

4.7 铝合金电缆桥架

桥架采用铝合金挤压成型，尺寸精度高、强度好、外形美观、重量轻、承载能力大，表面喷砂氧化生成一层天然的氧化保护膜，对大气和化学介质具有很强的耐腐蚀能力。铝合金电缆桥架如图 3.13-7 所示。

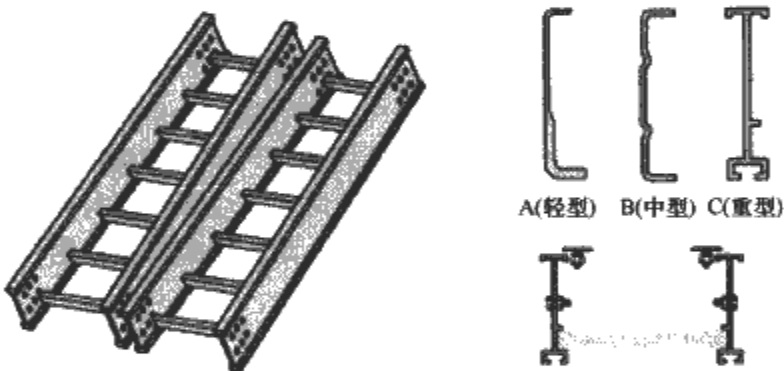


图 3.13-7 铝合金电缆桥架

5 系统安装空间布置图

梯级桥架空间布置图如图 3.13-8 所示，槽式桥架空间布置如图 3.13-9 所示，盘式桥架空间布置如图 3.13-10 所示，组合式桥架空间布置如图 3.13-11 所示。

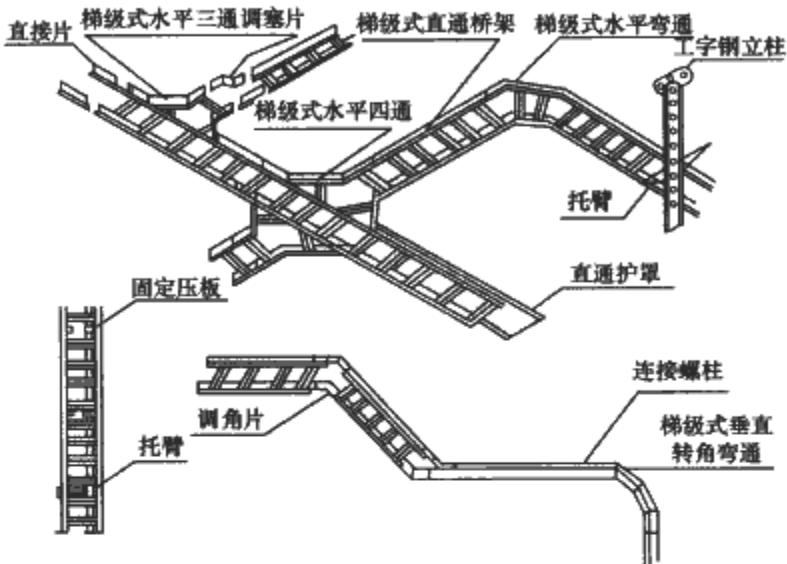


图 3.13-8 梯级桥架空间布置

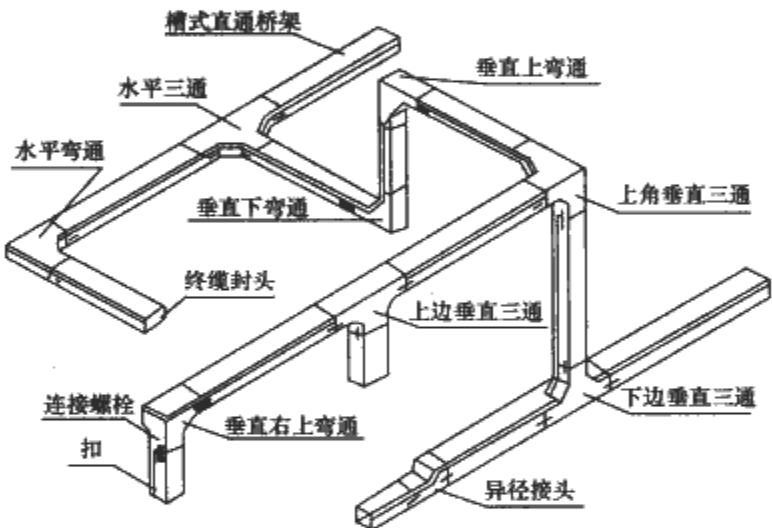


图 3.13-9 槽式桥架空间布置

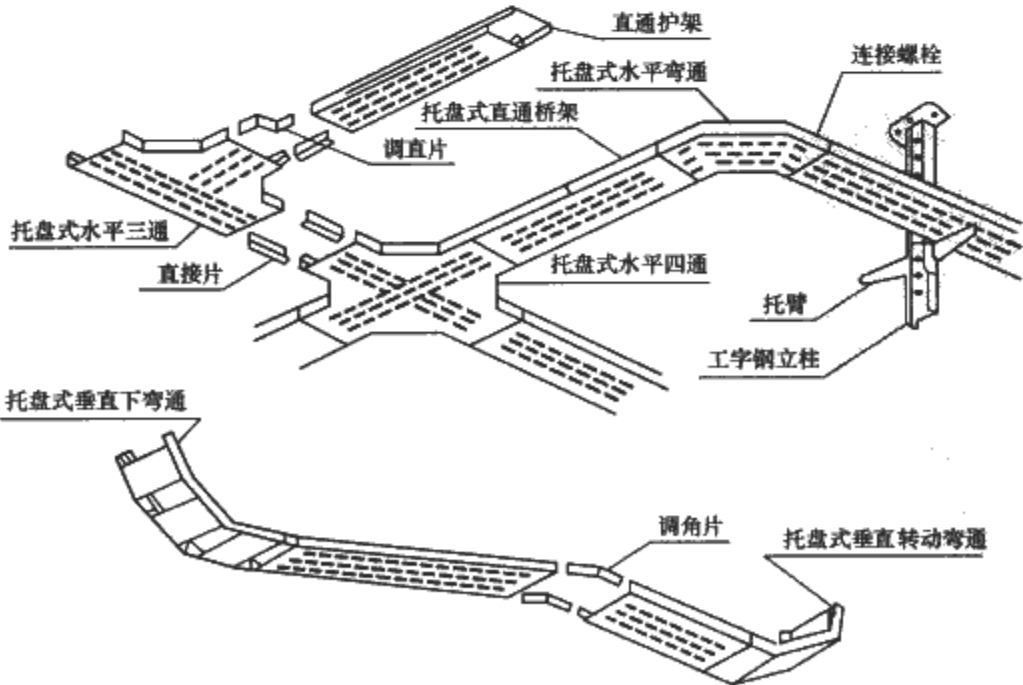


图 3.13-10 盘式桥架空间布置

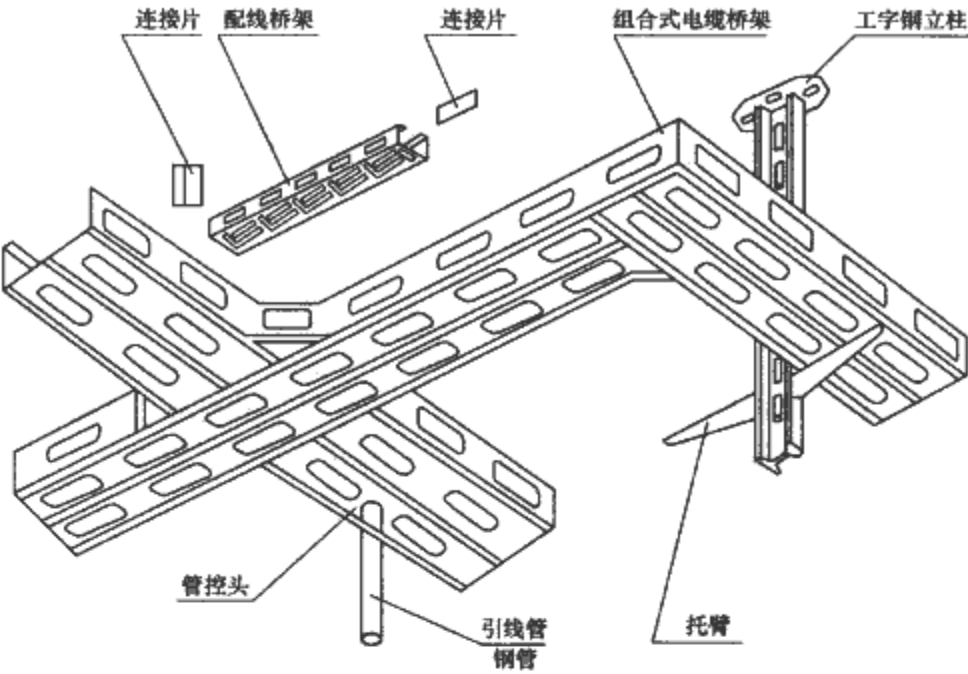


图 3.13-11 组合式桥架空间布置

第14章 高压/低压预装式变电站

1 简述

高压/低压预装式变电站（简称预装式变电站，又称箱式变电站），是低压开关设备的重要组成部分，是预装的并经过型式试验的成套设备。其基本包括高压侧配电、交流电压3.6~40.5kV变压器、低压侧配电。高压/低压预装式变电站可在地面安装，也可部分或全部地下安装。高压/低压预装式变电站是通过电缆与外部（进线或出线）连接。高压/低压预装式变电站也称移动式变电站，类似于可移动的变配电室，但包括低压控制设备。高压/低压预装式变电站是从高压HV级（或者说是中压MV级）进线受电，通过降压变压器、保护分断器件到低压分支配电、控制等完整的、紧凑的、高密度的集中高、低压电力配电系统于一体的成套设备。高压/低压预装式变电站执行GB/T 17467《高压/低压预装式变电站》。

2 高压/低压预装式变电站使用条件

高压/低压预装式变电站所是用一个外壳（金属或非金属）或一组外壳将上述设备封闭起来（见图3.14-1）。因此预装式变电站使用条件就要考虑到组成预装式变电站的三大部分，即变压器，高压开关设备和控制设备，低压开关设备和控制设备对箱体外的宏观环境和对变压器、高/低压开关设备工作的微观环境的不同要求。因为这三类设备对环境要求不尽一致，具体见GB/T 17467。

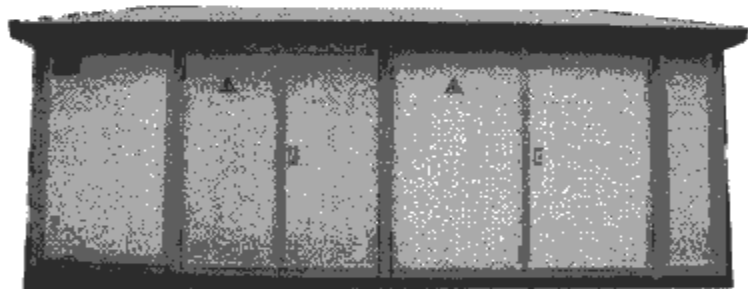


图 3.14-1 高压/低压预装式变电站

2.1 正常使用条件

(1) 外壳。除非标准另有规定，高压/低压预装式变电站的外壳防护等级设计应按GB/T 17467规定的使用条件下使用。即整体外壳按高压开关设备和控制设备的要求设计（高压/低压预装式变电站外壳内部的环境温度与外壳外部环境不同，外部为大气环境，它随安装地点改变，也许是严寒或酷热，而壳内温度则在低压成套开关设备和控制设备允许环境温度，如24h平均+35℃），高压/低压预装式变电站的外壳常使用非常良好的隔热材料，如蛭石。为了将壳内电器元件因发热引起的高温降下来，以利于高压/低压预装式变电站的长期工作安全，通常设有通风扇，以便进行壳体内部、外的热交换。

(2) 高压开关设备和控制设备。装在外壳内部，按GB/T 11022—1999规定的正常户内使用条件。

(3) 低压开关设备和控制设备。装在外壳内部，按GB

7251.1—2005规定的正常户内使用条件。

(4) 变压器。装在外壳内的变压器在额定电流下温升比无外壳条件下的要高，可能会超过GB 1094.2—1996或GB 6450规定的温度极限。

2.2 特殊使用条件

(1) 海拔。高压开关设备和控制设备，在海拔超过1000m的地区，按GB/T 11022的规定；低压开关设备和控制设备，在海拔超过2000m的地区，按GB 7251.1的规定；变压器，在海拔超过1000m的地区，按GB 1094.2或GB 6450规定。

(2) 污染。处于污染空气中的装置，其污染等级应按相应标准的规定。

(3) 温度。预装式变电站安装处的周围温度显著超出正常条件时，其优先选用的温度范围规定如下：严寒气候为（-50~40）℃，酷热气候为（-5~50）℃。

2.2.1 执行标准

(1) 高压开关设备和控制设备，按GB/T 11022和GB 3906的规定。

(2) 低压开关设备和控制设备，按GB/T 14048.1、GB 7251.1的规定。

(3) 变压器适用标准，符合GB 1094.1或GB 6450。

预装式变电站的使用条件应分别考虑箱体外部的宏观环境和箱体内部的微观环境。变压器这两种情况都有，应根据设备的型号提出不同的要求。本节所述“使用条件”是按正常使用条件要求的，用户有特殊使用环境要求，可参照有关标准在合同中注明。

2.2.2 预装式变电站外部环境使用条件

(1) 周围空气温度不超过40℃。且在24h内平均温度不超过35℃，最低温度对于“户外级”为-10℃，对“-25户外级”为-25℃，对“-40户外级”为-40℃。

(2) 应考虑中午高达100W/m²的阳光辐射，而不使温升超过额定值。

(3) 海拔不超过1000m。

(4) 周围空气所受的尘埃、腐蚀性气体、蒸汽和烟雾的污染，其污染等级不超过1级。

(5) 覆冰对1级不超过1mm，对10级不超过10mm，对20级不超过20mm。

(6) 风速不超过34m/s。

(7) 应考虑凝露。

(8) 来自高/低压开关设备和控制设备外部的振动可以忽略。

(9) 在二次系统中感应的电磁干扰的幅值不超过1.6kV。

3 高压/低压预装式变电站额定技术参数

3.1 额定电压

(1) 对高压设备和控制设备，按GB/T 11022的规定。

(2) 对低压开关设备和控制设备,按 GB 7251.1 的规定。

3.2 额定绝缘水平

(1) 高压设备和控制设备按 GB/T 11022 的规定,低压开关设备和控制设备按 GB/T 14048.1 和 GB 7251.1 的规定。

(2) 低压开关设备和控制设备的最低额定冲击耐受电压至少应为 GB/T 16935.1 中 IV 类过电压的给定值。

3.3 额定频率和相序

额定频率和相序按 GB/T 11022 和 GB 7251.1 的规定。

3.4 额定电流和温升

(1) 额定电流按 GB/T 11022 和 GB 7251.1 的规定。

(2) 温升。

1) 高压设备和控制设备按 GB/T 11022 的规定。

2) 低压开关设备和控制设备按 GB 7251.1 的规定。

3) 预装式变电站的某些元件,应按相关标准及规范,不应超各个元件的相应标准中规定的最高允许温度和温升极限。

4) 对于内部连接线最大允许温升,在 GB/T 11022 和 GB 7251.1 中规定的适用于触头连接以及和绝缘材料接触的的金属部件的值。对于变压器应按 GB/T 17467 的规定,并可按 GB/T 15164 和 GB/T 17211 的规定。

3.5 额定短时耐受电流

额定短时耐受电流指的是主回路、接地回路的额定短时耐受电流。

(1) 高压开关设备和控制设备按 GB/T 11022 的规定。

(2) 低压开关设备和控制设备按 GB 7251.1 的规定。

(3) 变压器按 IEC 76-5 和 GB 6450 的规定。

3.6 额定峰值耐受电流

额定峰值耐受电流是指主回路、接地回路的额定峰值耐受电流。

(1) 高压开关设备和控制设备按 GB/T 11022 的规定。

(2) 低压开关设备和控制设备按 GB 7251.1 的规定。

(3) 对于变压器按 IEC 76-5 和 GB 6450 的规定。

3.7 额定短路持续时间

(1) 高压开关设备和控制设备按 GB/T 11022 的规定。

(2) 低压开关设备和控制设备按 GB 7251.1 的规定。

(3) 变压器按 IEC 76-5 和 GB 6450 的规定。

3.8 操作机构和辅助回路的额定电源电压

(1) 高压开关设备和控制设备按 GB/T 11022 的规定。

(2) 低压开关设备和控制设备按 GB 7251.1 的规定。

3.9 操作机构和辅助回路的额定电源频率

(1) 高压开关设备和控制设备按 GB/T 11022 的规定。

(2) 低压开关设备和控制设备按 GB 7251.1 的规定。

3.10 预装式变电站额定最大容量

预装式变电站额定最大容量是设计变电站时指定的变压器最大额定值。变压器的额定值是由 GB 1094.1 或 GB 6450 中规定的变压器的额定容量和额定总损耗。

注:根据外壳级别和周围空气温度条件能将预装式变电站的输出容量限制到小于其额定最大容量。

3.11 额定外壳级别

(1) 额定外壳级别是对应于预装式变电站额定最大容量的外壳级别。

(2) 额定外壳级别用来决定变压器的负荷系数,使变压器运行时的温度不超过 GB 1094.1、GB 1094.2、IEC 76-5、GB 6450、GB/T17467 中描述的数值。

GB/T 17467 中有三个额定外壳级别:10、20 和 30,分别对应于 10K、20K 和 30K 的最大温升差值。

注:对应于变压器不同的容量和损耗,制造厂对同一外壳可以指定几个级别。这些附加的级别应经试验验证。

4 高压/低压预装式变电站电气线路

4.1 10kV 环网供电、高供低计电气系统

10kV 环网供电、高供低计电气系统如图 3.14-2 所示。

4.2 10kV 终端供电、高供低计带补偿电气系统

10kV 终端供电,高供低计带补偿电气系统如图 3.14-3 所示。

4.3 美式预装式变电站电气系统

美式预装式变电站的电气系统示例如图 3.14-4 所示。

4.4 35kV 组合式变电站电气系统

35kV 组合式变电站的电气系统示例如图 3.14-5 所示。

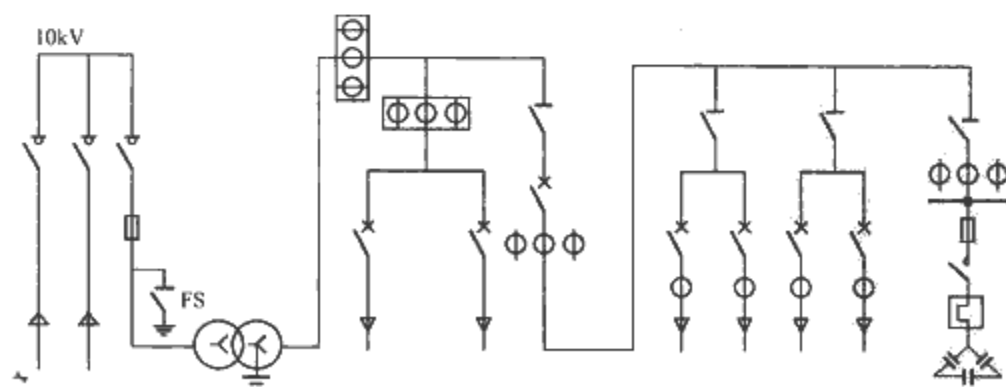


图 3.14-2 环网供电、高供低计电气系统

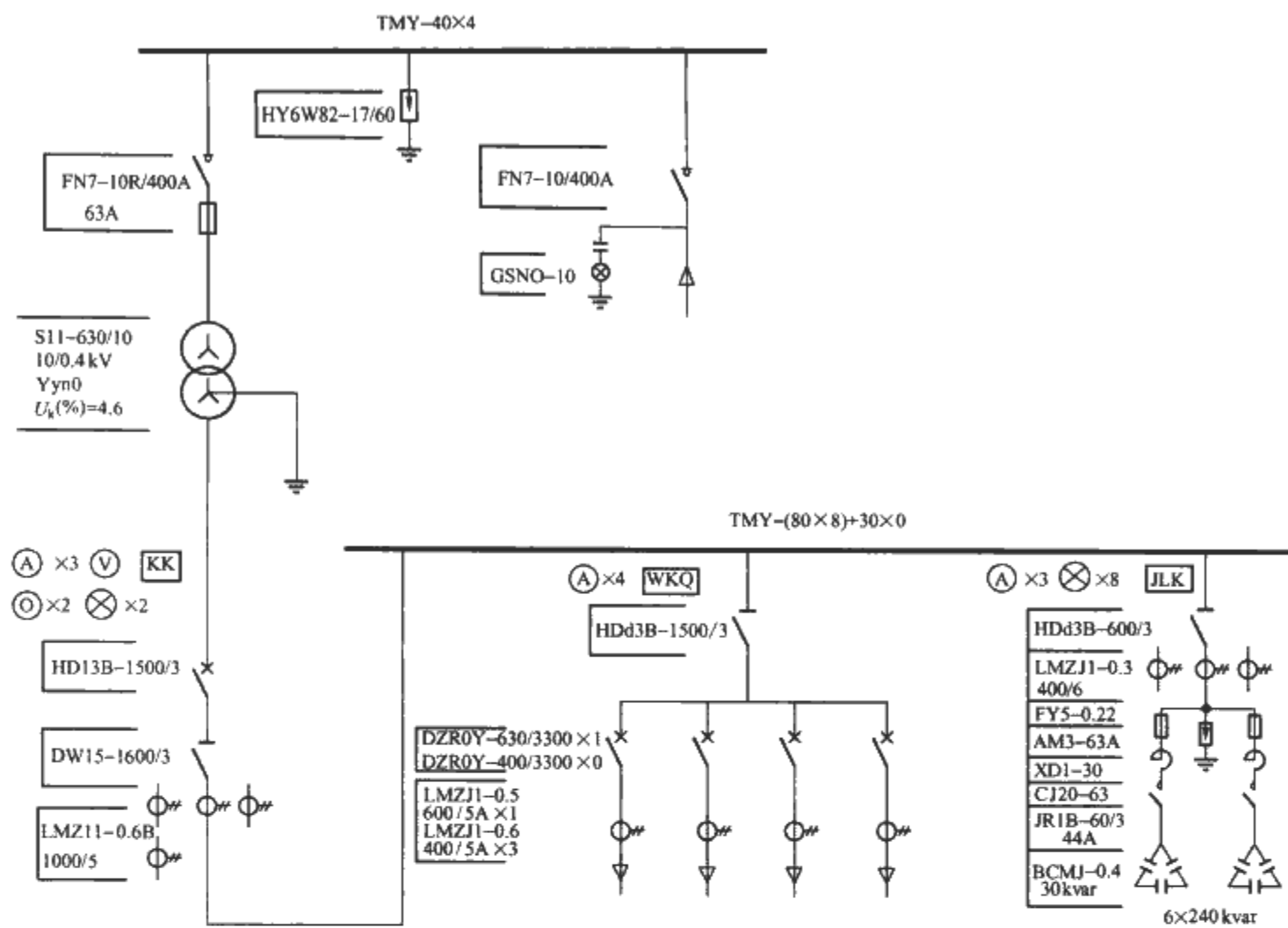


图 3.14-3 10kV 终端供电、高供低计带补偿电气系统

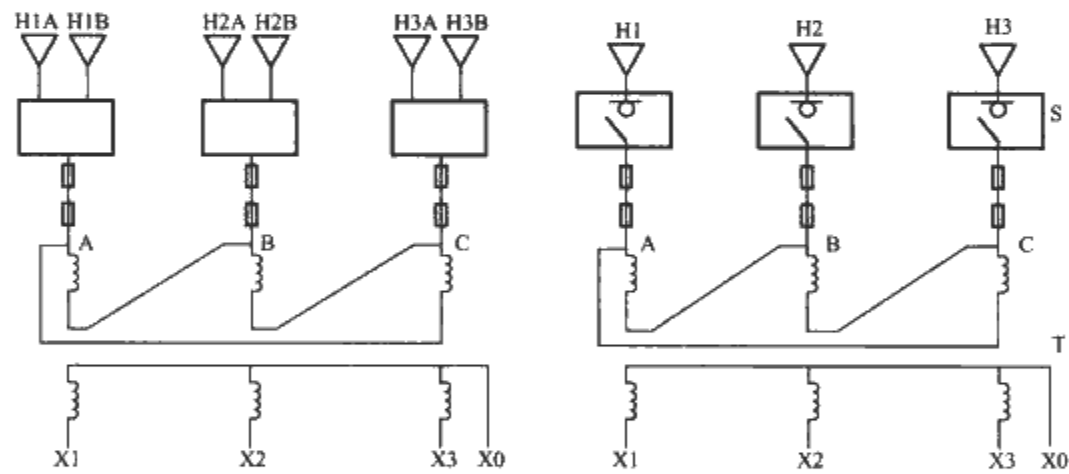


图 3.14-4 美式预装式变电站电气系统

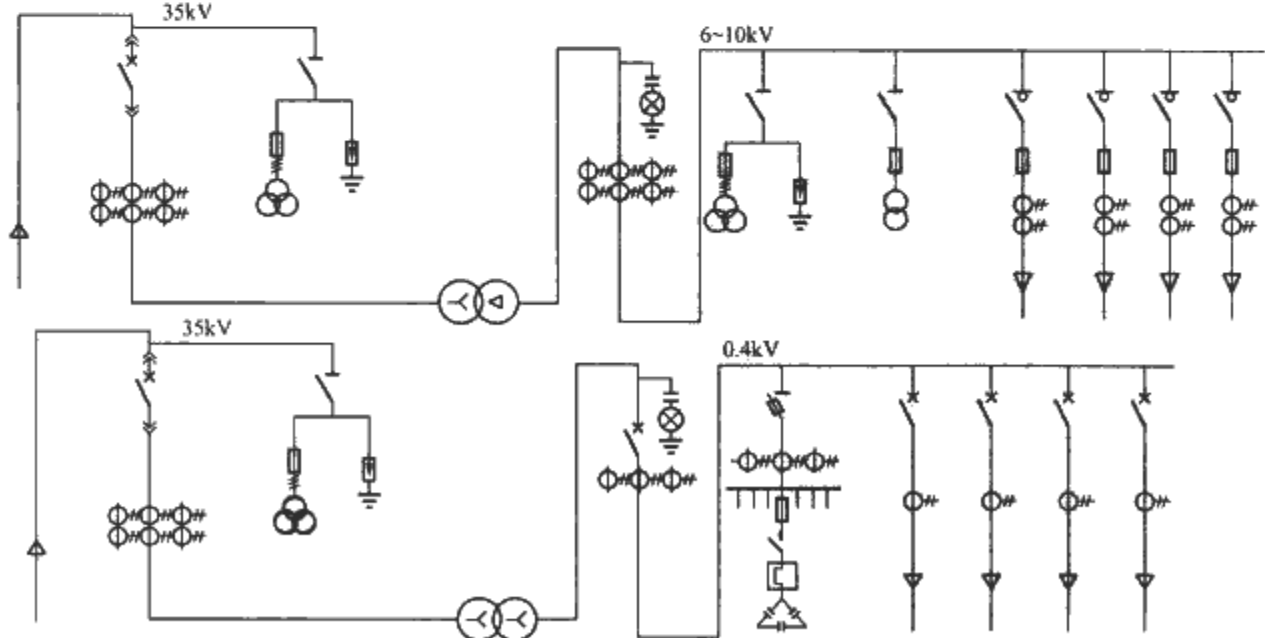


图 3.14-5 35kV 组合式变电站电气系统

5 高压/低压预装式变电站的结构

5.1 高压/低压预装式变电站的结构形式及特点

国内生产的高压/低压预装式变电站在结构上采用的是分隔一组合式。也就是围绕三大组成部分：配电变压器、高压开关设备、低压开关设备组成，在总的预装式变电站外壳内分别设立高压室、低压室、变压器室，然后按它们电能输送的路径与次序排列。排列的方式有组合式（欧式一目字型排型）、品字型排列（见图 3.14-6）、前后排列及一体化（美式预装式变电站）等。图 3.14-7 所示为这三个部分排列图。

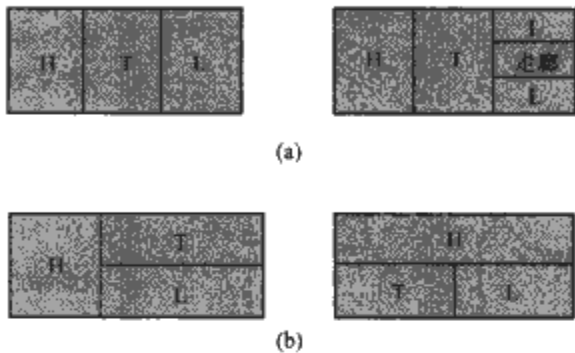


图 3.14-6 预装式变电站的结构
(a) 目字型结构；(b) 品字型结构
T—变压器室；L—低压室；H—高压室

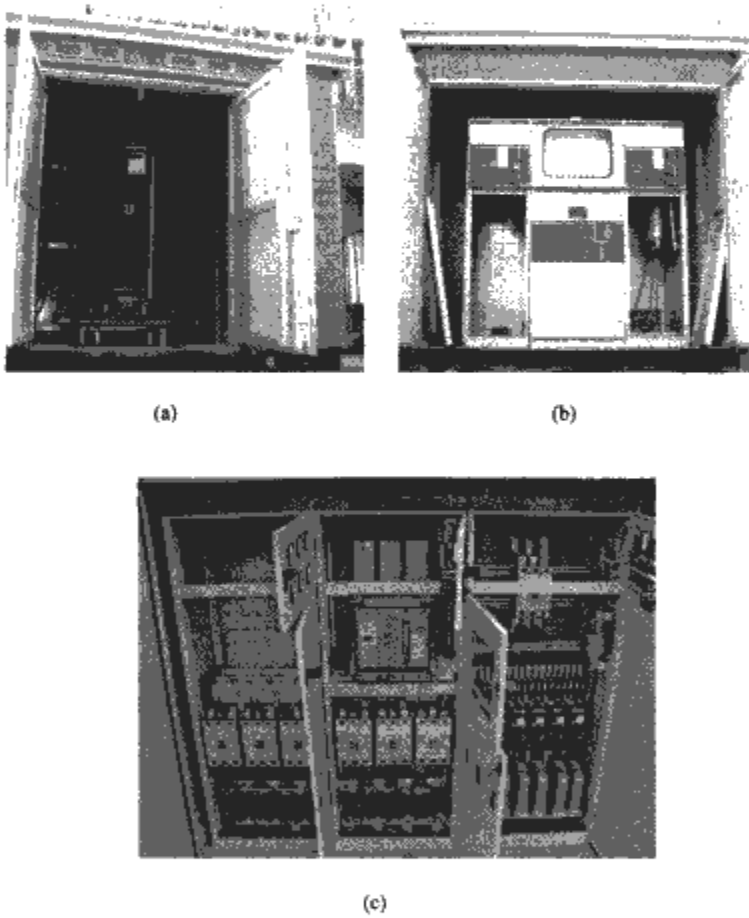


图 3.14-7 预装式变电站的结构中三个部分及实物图
(a) 变压器室；(b) 高压室；(c) 低压室

从预装式变电站壳体外部造型看有房屋式、集装箱式、柜式、大型和小型、带土建基础的，从内部配置分为欧式（见图 3.14-8）和美式；安装干式变压器如图 3.14-9 所示。预装式变电站安装位置方式有地面式、沉箱式、半地下式（其大部分在地下，只有防护顶在地上，见图 3.14-10），可用于带有绿化草坪的住宅小区、环保型旅游（见图 3.14-11）、从造型看可农用（见图 3.14-12）、工厂车间用，且有装饰型及豪华装饰型（见图 3.14-13）、专用架空型（见图 3.14-14）等。无论外部形式如何，在正面或侧面都有开门，以利操作与维修，且必须安装专用门锁，因为变电站是公众能接近的

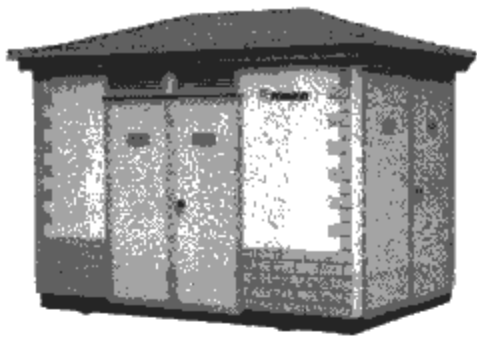


图 3.14-8 欧式预装式变电站

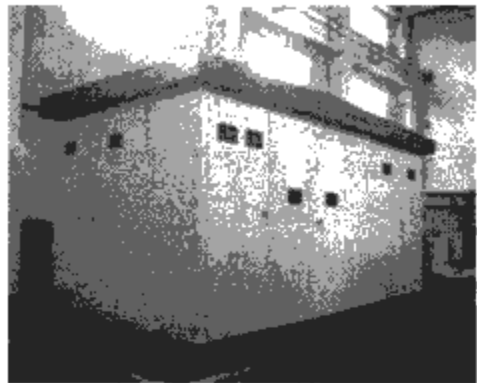


图 3.14-9 干式预装式变电站

户外预装式变电站，所以必须保证除专业人员以外任何人不能将门打开，以利安全运行。

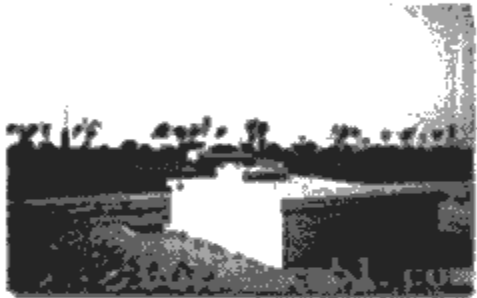
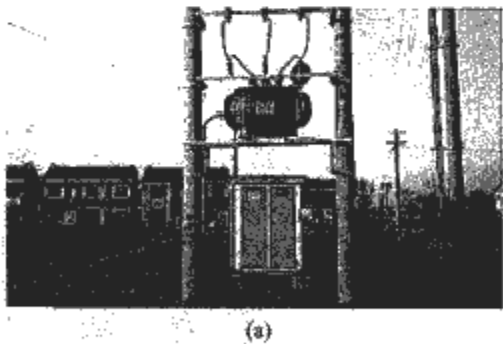


图 3.14-10 一般地埋式预装变电站



图 3.14-11 环保非金属型预装变电站



(a)



(b)

图 3.14-12 农用预装式变电站
(a) 农用高架式；(b) 农用普通式



图 3.14-13 装饰型预装变电站

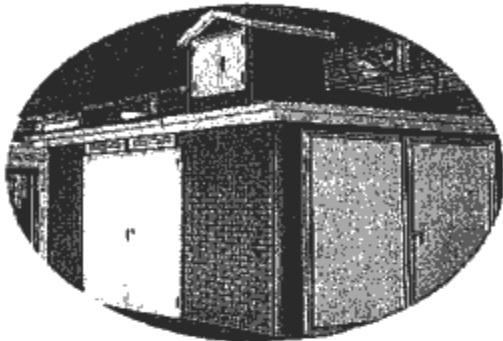


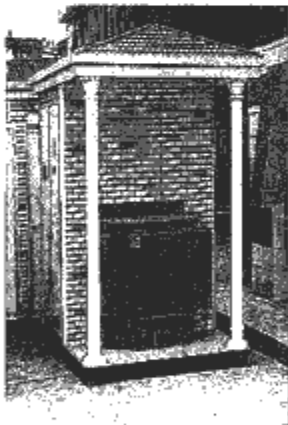
图 3.14-14 架空进线用预装式变电站

5.2 欧式预装式变电站

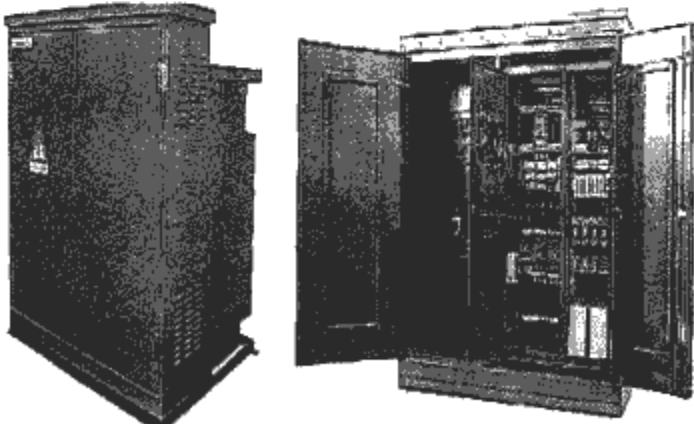
欧式预装式变电站指的是最早引进的预装式变电站（见图 3.14-8）。

5.3 美式预装式变电站

美式预装式变电站是 20 世纪 80 年代由美国生产投入运行（见图 3.14-15）。它的显著特点是将具有发热及燃弧危险的变压器铁心、高压负荷开关、保护用熔断器和变压器铁心同置于一注油铁箱中。因而整个预装式变电站的体积较小，既可用于室内，也可用于室外。体积仅为同容量其他预装式变电站的 1/3。



(a)



(b)

图 3.14-15 美式预装式变电站产品图
(a) 敞开顶式装饰预装式变电站；
(b) 工厂用美式线预装式变电站

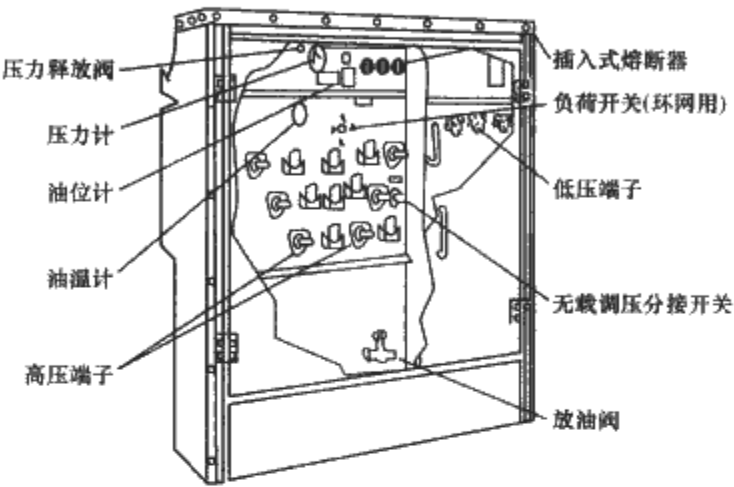
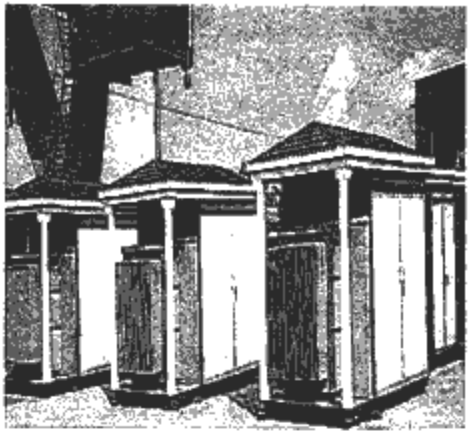


图 3.14-16 改进组合型美式预装式变电站

5.4 集装箱式预装式变电站

集装箱式预装式变电站如图 3.14-17 和图 3.14-18 所示，主要用于特大供电范围的工业设施、大型建筑工地、临时供电和其他场合。

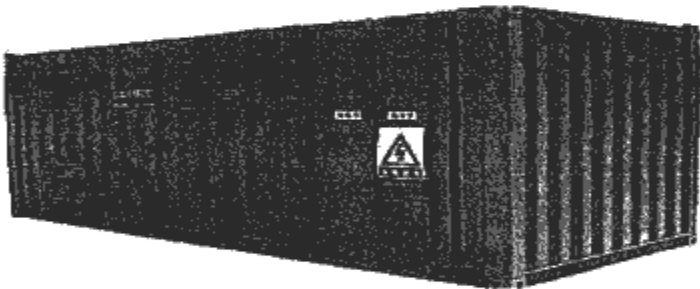


图 3.14-17 集装箱式预装式变电站

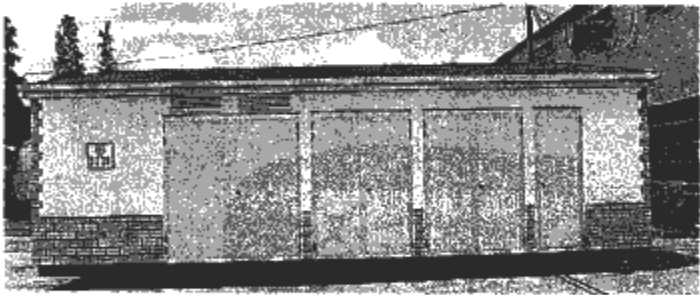


图 3.14-18 特大型预装式变电站

5.5 多箱式预装式变电站

多箱式预装式变电站见图 3.14-19。它适用于特大供电范围的工业设施、大型建筑工地、临时供电、采矿业和其他场合，可以分成多箱生产、运输，现场组装。

5.6 紧凑小型式预装式变电站

紧凑小型式预装式变电站（见图 3.14-20）是适合于高压 12~24kV 级、变压器为 1000kVA 以下，电缆电流额定值 630A 的公用配电网。是由中压系统直接向低压系统直接



图 3.14-19 多箱式预装式变电站

供电的配套设备，例如工业电网的特殊负荷中心，需要特别供电的消费者，需要把电站设计与周围环境相融合的地区。它通过全封闭环路装置，可做到在温度变化大、有凝结现象时也能长期运行。在外壳表面采取加大镀层（40~70μm）、改进边缘镀层（6~150μm）。门可选橡胶密封。

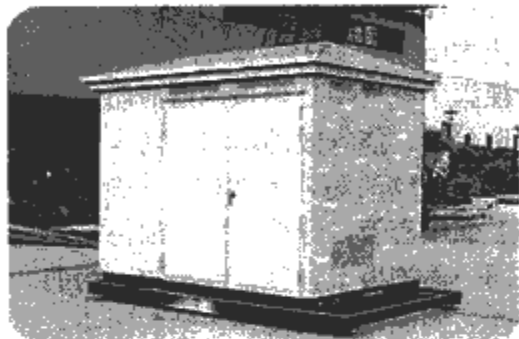


图 3.14-20 紧凑型预装式变电站

6 典型预装式变电站

6.1 35~10kV 系列预装式变电站

6.1.1 应用

本系列产品为高压侧输入为 35~10kV，低压侧输出为 0.4 的三相交流单母线系统的户外式成套设备，适用于大型工业、交通、矿山、能源重工领域以及城乡建筑工地的临时性供电设备。具有移动方便、成套性能优良等优势。

6.1.2 平面布置

35kV~10kV/0.4 系列预装式变电站的结构特点是：

(1) 高压室。35kV 高压室设于预装式变电站壳体的左侧，包括带手车存储、操作维修通道的断路器隔离离室，互感器隔离室，继电保护及直流电源、交流电源室。配电变压器室置于中部。低压部分包括进线柜、馈线柜、站用低压柜、TV 柜等，均置于壳体的右侧。三者大约所占比例分别为 41%：37%：26%。从电气设备选型看，可供选择的高压开关设备有 KYN-35、JYN-35、GBC-35 等手车柜方案。还有 10kV 开关室，设备包括 HXGN-10 环网柜，熔断器组合开关，电压、电流互感器，10kV/0.4kV 的 20kVA 控制变压器、直流电源，继电保护、接地保护及计量电表等；若采用不同电气线路时，设备包括：10kV、630A、配手车操作机构的隔离开关，10kV、1250A 配弹簧操作机构的真空断路器，10kV 电压、电流互感器，10kV/0.4kV 的 30kVA 控制变压器，继电保护、接地保护及计量电表等。若采用上述电气线路时，在表 3.14-1 中列出所选元件清单，其详细技术参数见表 3.14-1~表 3.14-7。

表 3.14-1 变压器技术数据			
型 号	额定电压 (kV)	额定容量 (kVA)	变压器变比 (kV/kV)
SZ7	35	400~20000	35/10~6.3, 35/0.4
S9	35	250~1250	35/10, 35/0.4

表 3.14-2 高压断路器技术数据

型 号	额定电压 (kV)	额定容量 (kVA)	额定短路开断电流 (kA)
SN10-35 ZN-35	35	1250	20
		600	25
SN10-19 ZN-35	10	1000	25
		1250	31.5
		1600	40

表 3.14-3 高压隔离开关技术数据

型 号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)
CN2	35	400
CN19-10	104	630/1000

表 3.14-4 控制变压器技术数据

型 号	额定电压 (kV)	电压比 (kV/kV)	容量 (kVA)
CN235	35	35/0.4	50
CN1910	10	10/0.4	20

表 3.14-5 电流互感器技术数据

型 号	额定一次电流 (A)	额定二次电流 (A)	准确级	10%倍数不小于	二次负荷 (A)
LCZ-35	50~200	5	0.5/3	10	50
LZJC-10	200~800	5	0.5/ (C915)		
LMZ-0.66	50~1500	5			

表 3.14-6 电压互感器技术数据

型 号	额定电压 (V)			额定容量 (kVA)			最大容量 (VA)
	一次	二次	辅助二次	0.5 级	1 级	3 级	
JDJ2	3500	100		150	250	500	1000
JDJ2-35	3500/√3	100/√3	100	150	500	500	1000

表 3.14-7 避雷器技术数据

型 号	额定电压 (kV)	残压峰值 (kV)
Y5W1-41/134	41	134
HI/5WS-665/45	165	45

(2) 配电变压器室。采用 S9 系列电力变压器，SZ9 系列有载调压器或干式变压器，变压器容量约为 1250kVA，但不配变压器外壳，直接将变压器置于预装式变电站中部小室，有利于自然通风散热。

(3) 继电保护小室。室内安装交流电源、直流电源、信号、保护、远动控制、载波机或光纤终端等。根据要求可采用常规继电保护，也可选用微机综合自动化系统。

6.1.3 安装检查试验调整

(1) 安装。本预装式变电站的主变压器室、35kV 高压开关室、0.4~10kV 开关室均为单独的运输单元，要在现场进行组装。电源的进线与馈线引出，都采用架空式电缆形式。若架空线进出，需在户外浇钢筋混凝土基础，主变压器要设放油槽。若是电缆进出，应在拼装前预留电缆沟，安装前要阅读制造厂的“随机文件”。

(2) 检查试验调整。投运前，变电站已调整好，一般情况不需再进行调试。但到达现场组装完毕后，若在检查时

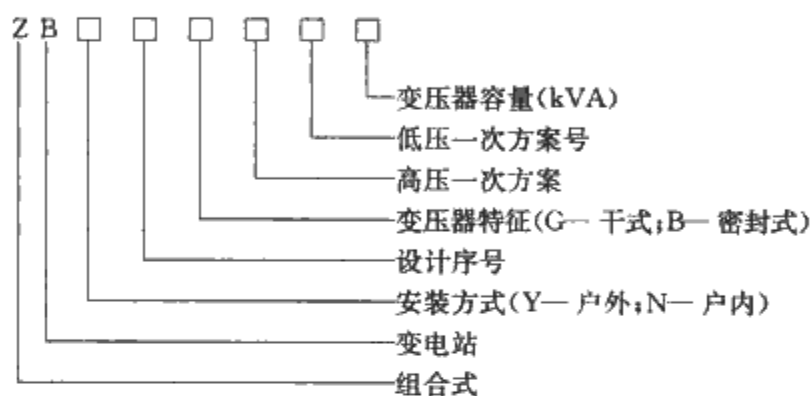
发现有关参数变化或不符合有关要求时,应进行调整。

(3) 试验。根据标准要求进行出厂试验,例如工频耐压试验:对 35kV 成套设备主回路为 95kV/min;对 10kV 成套设备为 42kV/min;对 5kV 成套设备为 32kV/min;而辅助回路,对 35kV 成套设备为 2kV/min;对 10kV 成套设备为 2kV/min;对 5kV 成套设备为 2kV/min。

6.2 10/0.4kV 高压/低压系列预装式变电站

6.2.1 ZBW-10/0.4kV 系列组合式变电站

ZBW-10/0.4kV 系列组合式变电站是 20 世纪 80 年代引入我国的,也称欧式变电站。它由变压器、高压开关设备和控制设备、低压开关设备和控制设备等元件组成。它的主要特点是低压成套设备和变压器独立组合而成,即高、低压成套设备装在预制的大箱体内,安装组合方便,内装用风扇通风。其型号说明如下:



6.2.2 10/0.4kV 美式预装式变电站

6.2.2.1 概述

继 20 世纪 80 年代欧式预装式变电站进入我国后,90 年代中期美式预装式变电站进入我国,它和欧式预装式变电站不同之处在于:美式预装式变电站将变压器铁心、高压负荷开关、保护用熔断器等设备统一设计,全部放在同一注油铁箱内,因而体积较小,安装迅速、灵活,既可用于户内,也可用于户外,广泛用于工业园区、居民小区和商业中心。美式预装式变电站在引进初期是全套原装进口,价格较高,加之变压器绕组接法不同,在我国投入电网运行后产生零点漂移,使用上受到很大限制。

美式预装式变电站结构分前后两个部分,前面为高、低压操作间隔,操作间隔包括高、低压端子,负荷开关操作手柄,无载调压分接开关插入式熔断器,压力释放阀,油温计,油位计,注油孔,放油阀等。后部注油铁箱及散热片,变压器绕组和铁心,高压负荷开关和保护熔断器。箱体为全密封结构,采用隐蔽式高强度螺栓及耐油脂橡胶胶圈来密封箱盖。箱体充分考虑防水、安全操作和安全要求。箱门为三点连锁,只有在打开低压间隔后才可打开高压间隔。

美式预装式变电站内充满二种绝缘油:一种为普通矿物油,性能与国产 45 号油相近;另一种为高燃点油,它是一种碳氢化合物油,燃点达 312℃(美国认证实验室认证为难燃油),它具有难燃,绝缘强度高,润滑性好,熄弧能力强,无毒等优点。

6.2.2.2 功能特点

- (1) 体积小,仅为国内通用预装式变电站的 1/3 左右。
- (2) 全绝缘结构,可以保证人身安全。
- (3) 采用高燃点油(燃点可达 312℃),可置于各种建筑物内,无火灾隐患。
- (4) 插入式熔断器,采用双熔丝保护,降低运行成本。
- (5) 既可用于环网,也可用于终端,转换十分方便。

(6) 200A 负荷电流,特殊情况下可作为负荷开关及隔离开关使用。

(7) 过载能力强,允许过载 2 倍 2h 而不影响预装式变电站寿命。

(8) 损耗小,低于国内 S9 型变压器的损耗。

(9) 采用 DYO 连接,及三相 5 柱式结构。

(10) 外壳采用防腐设计和特殊喷漆处理,可广泛用于高污染地区。

6.2.3 DXB-10/0.4kV 系列紧凑节能小型预装式变电站

6.2.3.1 产品特点

箱体的外壳材质采用 2.5mm 优质冷轧钢板,用数控机床加工而成,具有较高的机械强度,从整体上看有线条明快流畅的感觉,表面处理着色后与周围环境相协调。箱体内设有自然通风道,顶盖夹层中间填有 20mm 厚新型隔热材料,能有效地防止太阳光的直射;变压器除一面与箱体连接外,其余部分均裸露于空气中;箱顶四周有防雨檐。底部进线加装了宝塔形密封圈,能有效的防水、防尘、防小动物进入。

变压器采用波纹油箱,无油枕,全封闭的 S9 系列油浸变压器。高、低压套管,分接开关,油位指示,压力释放阀等,均装在同一侧面板上。侧板与相对封闭的高、低压室用螺栓紧密相连,构成箱体的整体。结构紧凑,体积小、重量轻,损耗低。以 500kVA 为例占地面积 2.56m²,比同容量老预装式变电站降低了 68%,质量仅 2.6t,比同容量老预装式变电站降低了 30%。

6.2.3.2 高、低压电器室电器布置

(1) 高压室内采用柜装式,内装 HXGN7 环网柜,电流高于 3500A。产品体积小,绝缘强度高,可在凝露和高海拔地区使用,三相熔断器安装在同一抽屉上,可从高压门抽出更换,安全方便。如需要,高压元件可固定安装。

(2) 低压室采用组装式,低压主开关选用抽出式结构,内装 QP 型隔离开关,体积小操作灵活,可带负荷开、断,主开关有 8 路输出回路。

(3) 低压室电容补偿也采用抽出式结构,电容器、接触器、热继电器、隔离开关等均装在同一抽屉内,检修时可从低压室侧门抽出,安装维护方便,隔离开关与外门连锁安全可靠。

6.3 智能型高压/低压预装式变电站

6.3.1 智能型预装式变电站概述

智能预装式变电站是将高压开关电气设备和二次智能化设备集中组合成一个可移动的预装式成套设备。它的控制模式是开关站+主变压器+二次智能化开关设备组成智能型预装式变电站,可实现“四遥”:遥测、遥信、遥调、遥控等系统管理和变电站无人值守的运行管理维护模式。它将智能型真空断路器作为可重合闸的断路器和分断路器应用到配电线路上。与智能控制配合使用实现智能化集中管理。

6.3.1.1 智能型高压/低压预装式变电站结构

智能型高压/低压预装式变电站或开关站基本结构与普通高压/低压预装式变电站无大的变化,外形尺寸也同高压/低压预装式变电站一致。但是由于内装有完成智能化任务的微电子设备,在非常窄小的空间内微电子设备与强电设备有很强的电磁耦合,因此对这些微电子设备及其电源设备都要有较好的电磁兼容措施,这些电磁兼容技术措施有:智能型高压/低压预装式变电站结构壳体的抗电磁干扰的措施及验收指标;安装在智能型高压/低压预装式变电站内的微电子设备必须具备抗电磁干扰的措施及验收指标;安装在智能型

高压/低压预装式变电站内的微电子设备用的电源设备也必须具备抗电磁干扰的措施及验收指标；如果内装的低压电器也是智能型的，则也必须具备抗电磁干扰的措施及验收指标；同时还要求按电磁兼容二类设备指标限制电磁发射。其中采用了插拔式四合一装置，可带电维护。

6.3.1.2 智能型高压/低压预装式变电站控制与保护

智能型高压/低压预装式变电站或开关站的二次系统采用有控制、保护、测量和信息远传功能，微机监控保护控制功能作用强大、稳定可靠，并辅以仿真、提示、“四遥”及防误操作程序等，使整个变电站控制得心应手。

(1) 变压器微机型数字式监控保护装置。它的控制功能有：实现对主变压器，高、低压控制设备断路器实现遥合、遥分、手合、手分、遥（手）合加速跳，跳闸保护。保护功能有：设定时限过电流，电流速断，二次谐波制动和比率制动的差动，瓦斯及温度保护；当主变压器采用熔断器保护、在高压侧选用负荷开关时变压器自动保护装置中取消了差动保护，增设了高压熔体缺相保护，即当高压侧某相熔体熔断后，立即切除变压器低压侧负荷，并向调度系统发出故障信号，以减少用户损失。信号功能有：断路器位置信号及各保护信号、遥信与现场信号并存。测量功能有：检测电压、电流、有功功率、无功功率、频率、功率因数、用电时间及负荷变动曲线等。

(2) 线路微机保护监控装置。它的保护功能是：速断、过电流、过载、零序电流、三相一次重合闸、低周波减载保护。检测参数功能有：测量电流、电压、有功功率、无功功率、有功电流、无功电流、频率等。控制功能是：断路器位置信号、各保护动作信号、遥信信号、现场信号（与遥信信号并存）。

(3) 电容器微机保护监控装置。保护功能有：远断、过电流、过电压、欠电压、不平衡电流、平衡电压保护。检测功能有：相电流、线电压、频率、无功电流、功率因数、无功电能等电量测量。控制功能有：能实现遥合、遥分、手合、手分、遥（手）合加速跳、跳闸保护、防跳跃控制。信号功能有：断路器位置信号、各保护动作信号、遥信信号与现场信号并存。

6.3.1.3 自动化系统

自动化监控保护监控、保护设备是智能型高压/低压预装式变电站自动化系统中的重要设备。它分主设备保护设备、输电线路保护设备、安全设备、自动化监控设备及电力系统用通信设备等。

6.3.1.3.1 EDCS5000 型电力系统综合自动化装置

(1) 主要功能特点。采用一个单元对应于一台断路器或某一设备的设计思路。每个单元采用一块电路板总线制，充分考虑电磁兼容性。硬件标准化，充分发挥软件功能，单元硬件种类少，电路简单，模块硬件通用，组合方式灵活。可选用不同单元构成不同电压等级的不同保护、监控功能的综合自动化系统。本系统属于分散控制系统，每个断路器对应一个分散式单元，就地完成所有测量控制与保护功能。该系统属于高可靠设计，任意元件损坏不影响系统正常工作，可实现自检、自测试、自维护功能，准确度高。该系统也属于开放式系统，可接入其他微机设备。

(2) 主要技术参数。

1) 系统主机采用高档工控微机，实时通信网络与分散系统联网，用分散式数字保护单元。开关量输入： $+24\text{V}$ 电平 5mA ，隔离电压 2000V 。测量精度：电流 $\leq 2\%$ ，电压 $\leq 0.5\%$ ，功率电压 1% ，其他 1% 。使用环境温度为一 $10\sim$

$+35^{\circ}\text{C}$ ，储存温度为 $(-40\sim 85^{\circ}\text{C})$ 。外形尺寸： $2260\text{mm}\times 800\text{mm}\times 600\text{mm}$ ， $2360\text{mm}\times 800\text{mm}\times 600\text{mm}$ 。

2) 电流回路功耗 $< 0.5\text{VA/相}$ ，电压回路功耗 $< 0.5\text{W/相}$ ，工作电流功耗 $\leq 15\text{W/相}$ 。

3) 保护工作精度。过电流保护 $\leq 2\%$ ，电压保护 $\leq 2\%$ ，速断保护 $\leq 5\%$ ，差动保护 $\leq 3\%$ 。测量精度：电流电压 $\leq 0.5\%$ ，功率 $\leq 1\%$ ，频率 $\leq 0.01\text{Hz}$ 。

4) 装置使用环境温度为 $0\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，储存温度为 $-20\sim +70^{\circ}\text{C}$ 。

6.3.1.3.2 PSU-2000 型变电站综合自动化系统

(1) 主要功能特点：分层分布，全分散式配置，保护监控单元与一次设备间隔对应。

1) 全封闭单元，抗电磁干扰能力强。

2) PSU 功能全，配置灵活，具有继电保护、远动、监控、小电流接地选线等功能。

3) 电能计量可选用功率积分、脉冲技术和数字电能表接口三种方式。

(2) 主要技术参数：直流 220V ；交流 220V ， 50Hz 。

1) 单元电源功耗 $< 10\text{W}$ ，电流、电压输入电路功耗 $\leq 0.5\text{VA}$ 。

2) 电压、电流测量精度 $\leq 0.3\%$ 。

3) 有功、无功功率测量精度 $\leq 0.5\%$ 。

4) 频率测量精度 $\leq 0.02\text{Hz}$ 。

5) SOE 分辨率 2ms 。

6.3.1.3.3 DISA-2 型全分散式变电站综合自动化系统

(1) 主要功能特点：

1) 采用面向对象的设计，每单元实现相应对象（进线、主变压器、馈线、电容器等）的所有监控、保护功能，全分散式配置。

2) 采用现场总线网络 CANBUS 和光纤技术，降低通信误码率。

3) 采用大屏幕汉字液晶显示技术和薄膜键盘结构。

4) 采用进口接插件及特别的设计。

5) 具有远方自诊断功能，通过电话网处理装置故障。

(2) 主要技术参数：

1) 通信速度 1s ，分辨率 1ms ，容量 ≤ 4096 。

2) 测量容量。128 交流测点，1024 点直流，精度 0.5% 。

3) 遥控最大配置 256 点。

4) 脉冲电度表容量 ≤ 12 对。

5) 总控。调度配置最大 6 主 6 备，通信 CDT、SC1081、8890、TALUS、DNP、U4F、MODBUS 等，在线修改，双机切换时间为 $2\sim 6\text{s}$ 。

6) 后台计算机。系统可利用率 $\geq 99.9\%$ ，画面刷新时间 $\geq 1\text{s}$ ，可定义画面调用时间 $\geq 2\text{s}$ ，画面容量 ≥ 500 幅，报表容量 ≥ 500 张。

7) CPU 数量。系统最大可接 128 个功能 CPU。

8) 通信总线。125kHz，最大 530m 双绞线；1MHz，双绞线 $\leq 40\text{m}$ 。

6.3.1.3.4 BJ-2000 系列无人值守变电站

(1) 主要功能特点：具有三种模式：①一、二次设备室外化；②一次设备室外安装，二次设备室内安装；③一、二次设备（除主变压器外）装于可移动箱内。主要包括 BJT-2001 变压器保护装置、BJT-2002 变压器保护装置、BJT-2001 线路保护装置、BJT-2001 电容器保护装置、BJT-2001 备用电源自投装置。

- (2) 主要技术参数:
- 1) 变压器遥控、通信及保护。
 - 2) 馈线保护, 具有遥控、通信功能。
 - 3) 电容器保护, 具有遥控、通信功能。
 - 4) 通信信道根据需要可选择电话线, 无线电扩频和电力载波方式。
 - 5) 工作电源交流 220V, 以 UPS 电源作后备。

6.3.1.3.5 XND-2000 系列农网变电站自动化系统

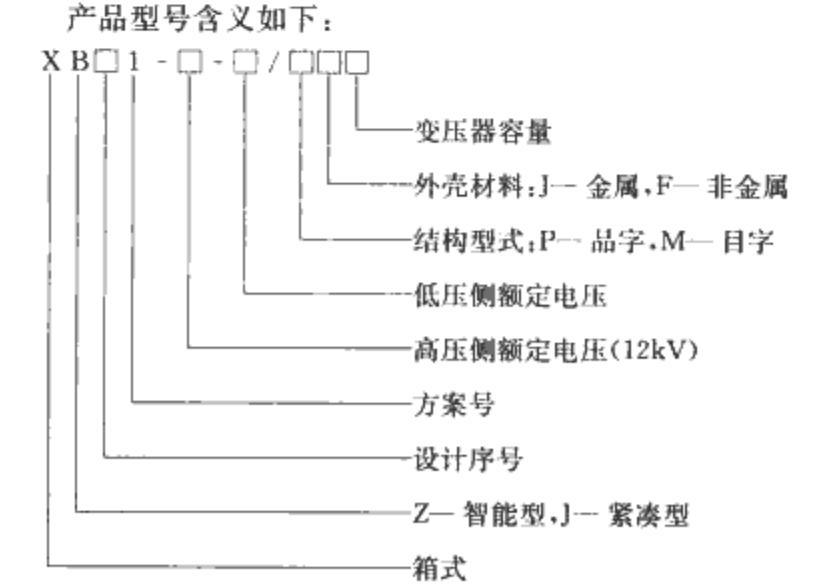
- (1) 主要功能特点: 功能齐全, 包括变电站、当地微机监控、微机远动、微机继电保护等功能, 实现无人值守。
- 1) 合理的联机网络结构, 有效地防止数据传输可能出现的瓶颈效应。
 - 2) 采用 Windows 多任务操作平台, TCP/IP 网络协议, 便于升级。
 - 3) 标准化的组态软件; 全汉化的中文界面; 完备的在线帮助。
 - 4) 应用于 66kV 及以下等级变电站。

- (2) 主要技术参数:
- 1) 额定参数。相电压为 $100/\sqrt{3}$ V, 开口三角形电压为 100V, 工作电源为交流 220V, 频率为 50Hz, 电流为 5.1A, 直流电压为 220V 或 110V
 - 2) 测量精度。电压、电压量为 0.2 级, 有功功率、无功功率、功率因数为 0.5 级。
 - 3) 频率 0.1 级。事件顺序记录 ≤ 2 ms。
 - 4) 通信节点容量 64 个, 远动传送速率 (bit/s): 300、600、1200 可选。
 - 5) 使用环境温度为 $(-60\sim+60)^{\circ}\text{C}$ 。

6.3.2 XBZ1 系列智能型高压/低压预装式变电站

XBZ1 系列智能型高压/低压预装式变电站收集了美式预装式变电站、欧式预装式变电站和国产预装式变电站的优点, 采用了新材料、外观新造型和自动化技术, 用于中心控制站或物业管理小区的上传机对变电站进行遥测、遥信、遥调、遥控等系统管理, 有 67 种方案, 能满足不同应用需要。当多台智能型高压/低压预装式变电站连接成环网供电时, 能完成故障区段的定位, 及时切除故障、负荷转带、网路重构等功能。做到较短时间 (约 1min) 恢复供电。

可用于城市建筑、居民小区、市政设施、工厂、矿山、公路、码头、油田、及临时施工工地用电场所, 作为变配供电设备。



基本技术数据:

- (1) 额定电压。主回路高压侧为 12kV; 低压侧为 0.4kV; 辅助回路交流为 110V, 220V, 380V, 直流为 24V。
- (2) 变压器额定容量 (kVA): 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600。
- (3) 额定电流: 高压为 400A、630A, 低压为 100~2500A。
- (4) 额定频率: 50Hz (60Hz)。
- (5) 额定短时耐受电流: 高压开关设备为 12kA、16kA、20kA。低压开关设备为 250~315kVA, 15kA; 400kVA, 30kA; 1000kVA 及以上, 按实际短路电流进行。额定峰值耐受电流为 30kA, 40kA, 50kA 及以上。
- (6) 绝缘水平。高压电器设备耐压值, 低压设备耐压值, 变压器耐压值分别见表 3.14-8、表 3.14-9 和表 3.14-10。

表 3.14-8 高压电器设备耐压值

额定电压 (kV)	雷电冲击电压 (kV)		1min 工频耐受电压 (kV)	
	对地及相间	隔离断口	对地及相间	隔离断口
10	75	85	42	48

表 3.14-9 低压设备耐压值

额定电压	$60\text{V}\leq U_n\leq 300\text{V}$	$300\text{V}\leq U_n\leq 660\text{V}$
工频耐受电压 U	2000V	2500V

表 3.14-10 变压器耐压值

额定电压	6kV	10kV
工频耐受电压	25 (20) kV	35 (28) kV
冲击电压峰值	60kV	75kV

- (7) 额定噪声水平。油浸式变压器小于或等于 50dB, 干式变压器小于或等于 55dB。
- (8) 无功补偿容量为变压器视在容量的 30% (也可按用户要求增减)。

XBZ1 系列智能型高压/低压预装式变电站的基本结构按材质分为金属壳体、非金属壳体两类, 其中非金属壳体采用增强玻璃纤维和特种水泥合成预制, 有较高的力学强度, 耐冲击性能好, 不易导热, 有防火阻燃性能及防腐特性、使用寿命长, 其形状为房屋型, 美观、大方。

第15章 低压成套设备壳体

1 概述

在低压成套设备的设计生产中,设备的壳体是一个十分重要的部分。该壳体是用户在安装开关设备和控制设备元件之前的产品。低压成套开关设备和控制设备的壳体是用在额定电压为交流不超过1000V,频率不超过1000Hz或直流不超过1500V的设备中,可适用于户内或户外。

一般来说,所谓成套设备的壳体是用于支撑和安装电气设备的壳体,其内部空间能对外界影响提供适当的防护,且规定了接近或接触带电部件及接触可移式部件的防护等级。

一个完整的壳体包括外壳,如柜架、柜壳;结构部件,如抽屉、插件等。其他的一些壳体还有箱体、控制(操作)台等。通常壳体可以分成4个层面:第1层是部分结构散件,如安装支架等;第2层是接插件,如在一些控制柜中的控制板插件;第3层是各种抽屉和框架单元;第4层是柜壳。它们组合在一起构成了一个完整的壳体。

在壳体的设计中,一个重要的遵循原则是设计中的人机美学。在机械结构艺术造型中,研究人机学的目的,就是在遵循造型的形式美的规律的同时,必须符合人体功能的要求。在结构设计时就应考虑到创造一个良好的工作条件 and 环境,保证操作者能够在最佳环境内高效、高可靠性地操作设备。因此,必须考虑到人的生理、心理特点如何与操纵系统结合,并按照人的功能特点设计确定工作条件、信息传递方式和操纵机构,使“人一机”系统达到最佳参数。如果一台机械结构的造型能给人以视觉、触觉的美感因素,创造出一个具有舒适美的环境,就能减少精神上的负担和工作疲劳,给人以轻松感,操作方便,反应准确,必然会扩大经济效益,提高管理水平和改善工作质量;同时也会引起管理和操作人员的精心爱护和使用,从而延长结构的使用寿命,减少废品,提高工效。

由此可见,要设计出合理、高效的机械结构,艺术造型设计必须从人机学的观点去确定适合人体测量学特点的结构系统图,确定结构的有效工作范围和造型尺度,选择操纵指示装置的合理形式与布局,取得最有利的操纵姿态和动作轨迹,选择适合的操纵力,研究操作与信息传递的准确性和可靠性问题。

2 标准及主要技术要求

2.1 标准

低压成套开关设备和控制设备的壳体应符合 GB/T 20641—2006《低压成套开关设备和控制设备空壳体的一般要求》(等同于 IEC 62208:2002)。

2.2 基本概念

在结构设计中,涉及一些专用的术语。按照标准规定,下面给出部分常用术语及其定义。

(1) 防护空间。由制造商规定的,用于安装开关设备和

控制设备并提供规定防护的壳体内部空间或部分内部空间。

(2) 覆板。壳体的外部部件。

(3) 门。带铰链的或可滑动的覆板。

(4) 安装板。用于安装电器元件的壳体内部的独立部件。

(5) 电缆密封板。壳体的可移式部件,用于保护和密封进口处的电缆、导体和导线管。

(6) 可移式覆板。设计用于遮盖壳体外部敞露处的一种覆板,当进行某些操作或检修时,可将其移开。

注:盖板可认为是一种可移式覆板。

(7) 壳体制造商。壳体的制造商或对销售负责的销售商。

(8) 箱。尺寸较小的壳体,一般用于安装在垂直面上。

(9) 柜。尺寸较大的壳体,一般竖立在地面上,它可以包括几个柜架单元、框架单元或隔室。

注:不规则形状的壳体,例如台式壳体,试验时可按柜考虑。

(10) 安装框架。用于支撑各种元件并且适合于在成套设备中安装的一种框架。

(11) 外壳。能提供适合于预期用途的式样和防护等级的空间。

(12) 盖板。通常是指箱式成套设备上的一种部件,用它来遮盖外壳上的开口。用螺钉或类似方法将其固定,设备投入运行后一般不再拆卸。

注:此盖板上可配备电缆入口。

(13) 电气防护挡板。对来自入口处任一有效方向的直接接触进行防护的部件。

2.3 分类

壳体分类如下:

(1) 按材料类型分:绝缘型、金属型、绝缘和金属混合型。

(2) 按安装方式分:竖立地面、墙壁安装、嵌入安装、电杆上安装。

(3) 按使用场所分:户外、户内。

(4) 按防护等级分:IP代码,如IP20、IP54;IK代码,如IK10。

2.4 主要技术要求

2.4.1 文件

壳体制造商提供的文件应包括所有相关的结构、机械性能、壳体的分类及用于壳体的正确操作、装配、安装和壳体使用条件的所有必要信息,还包括该标准提及的资料——可以利用与有效冷却表面有关的热功率损耗资料,向用户提供选择安装电气设备的正确数据。在计算时,假定所选设备产生的热在保护空间内部分散均匀。

2.4.2 使用条件

壳体制造商应规定壳体的使用场所。壳体一般适用于下述使用条件。

2.4.2.1 正常使用条件

2.4.2.1.1 周围空气温度

(1) 户内安装场所使用时。周围空气温度不得超过 $+40^{\circ}\text{C}$ ，而且在24h内其平均温度不超过 $+35^{\circ}\text{C}$ ，周围空气温度的下限为 -5°C 。

(2) 在户外安装场所使用时。周围空气温度不得超过 $+40^{\circ}\text{C}$ ，而且在24h内其平均温度不超过 $+35^{\circ}\text{C}$ ，温带地区周围空气温度的下限为 -25°C ，严寒地区周围空气温度的下限为 -50°C 。

注：在严寒地区使用壳体，壳体制造商与用户之间需要达成一个专门的协议。

2.4.2.1.2 大气条件

(1) 在户内安装场所使用时的大气条件。空气清洁。在最高温度为 $+40^{\circ}\text{C}$ 时，其相对湿度不得超过50%。在较低温度时，允许有较大的相对湿度，例如在 $+20^{\circ}\text{C}$ 时相对湿度为90%。

(2) 在户外安装场所使用时的大气条件。最高温度为 $+25^{\circ}\text{C}$ 时，相对湿度短时可达100%。

2.4.2.2 特殊使用条件

如存在下述任何一种特殊使用条件，要在用户和制造商之间达成特殊协议，达成的协议不能同任何强制的安全规范相矛盾。特殊使用条件举例如下：

- (1) 非正常的周围空气温度和湿度。
- (2) 存在腐蚀性物质。
- (3) 存在特定的尘埃（煤、水泥等）。
- (4) 异常机械应力（地震等）。
- (5) 存在动物群、植物群、霉菌。
- (6) 电离影响。
- (7) 电磁干扰。
- (8) 振动。

达成的协议不能同任何强制的安全规范相矛盾。

2.4.2.3 运输和储存条件

如果没有其他规定，温度在 $(-25\sim 55)^{\circ}\text{C}$ 范围内适用于运输和储存过程。在短时间内（不超过24h）可达到 $+70^{\circ}\text{C}$ 。

2.5 设计和结构

2.5.1 总则

壳体应由能够承受一定的机械应力、电气应力及热应力的材料构成，而且能承受正常使用时可能遇到的潮湿影响。考虑预期使用条件，应通过采用合适的材料或在裸露的表面涂敷防腐层以确保防腐。用耐腐蚀验证检查是否符合这一要求。另外，用绝缘材料制作的壳体或壳体部件，应验证其热稳定性、耐热性、耐火和耐老化性能。壳体中的部件设计为支撑载流部件时，应采用相关标准进行设计和验证。

2.5.2 尺寸

给出的尺寸以毫米（mm）为单位。外形尺寸：高、宽和深是标称值，应列在壳体制造商的产品样本中。电缆密封板、可移式覆板和手柄不应包括在外部标称尺寸中，这些尺寸应包括在制造商的文件中。

2.5.3 安装布置

(1) 壳体。安装壳体的方法与场所应在壳体制造商的文件中给出规定。

(2) 设备安装面。设备安装面的位置及其固定方法应在壳体制造商的文件中给出规定。

2.5.4 静负载

壳体内部安装板和安装设备的支撑件以及门上的最大允

许负载应在壳体制造商的文件中给出规定。

2.5.5 提升与搬运保障

如需要，应为壳体提供合适的起吊装置或搬运工具。应在壳体制造商的文件中，给出这类装置或工具放置的正确位置 and 安装方法，并规定起吊装置的螺纹尺寸（如果有的话），或在说明书中明确壳体搬运方法。

2.5.6 进入壳体内部

通过壳体的门或可移式覆板才可充分进入防护空间，进入该空间应使用钥匙或工具。应使用工具才允许从外部移开电缆密封板和覆板。

2.5.7 保护电路

金属壳体应通过壳体的导电结构部件，或通过独立保护导体（接地）连接的保护电路，或通过二者来保证电连续性。壳体制造商应在技术文件中说明，壳体本身是否满足这一要求，或者是否和怎样将分开的保护导体与装置的保护电路进行连接。

当一个壳体的可移式部件被移开时，壳体的其余部件不允许与保护电路断开。不含有电气设备的壳体，通常采用金属螺钉连接件和金属铰链固定盖板、门、可移式覆板及类似部件，即可保证保护电路的连续性。安装有电气设备的壳体，则需提供附加手段来保证保护电路的连续性。

壳体制造商应提供便于最终成套设备制造商进行外部保护导体连接的方法。该方法所述的连接位置及故障条件下设计的 I^2t 耐受能力应在壳体制造商的文件中给出。

注：最终成套设备制造商应确保保护电路的设计能够耐受安装处可能发生的最大动、热应力。

2.5.8 介电强度

绝缘材料制作的壳体应满足标准规定的介电试验。

2.5.9 防护等级——IK 代码

壳体应符合 IEC 62262:2002 的机械撞击防护等级。制造商应给出该防护等级。

2.5.10 防护等级——IP 代码

防护等级应符合 GB 4208 及壳体制造商的规定。

2.6 典型柜体分析

国内有多种低压成套开关柜体，其中固定式与进线柜一般壳体变化不大，内部结构主要取决于所装断路器等的能力和柜体的分隔形式，而抽出式在不同的型号产品中变化比较大。下面以 QMS 为例加以详细说明。柜体图如图 3.15-1

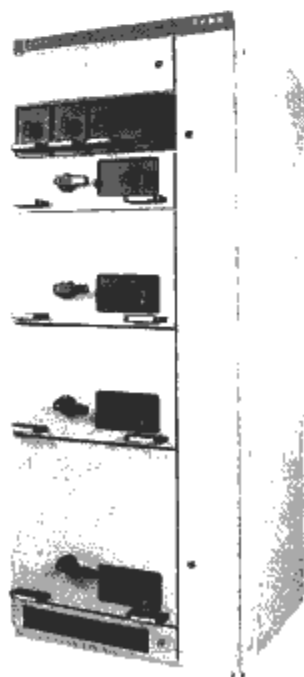


图 3.15-1 典型柜体

所示。

2.6.1 产品的电气参数

无论什么形式的柜体,电气性能是主要技术参数之一,也是成套设备最关键的性能指标。QMS 产品的技术参数如下:

- (1) 额定工作电压:主电路 660V,辅助电路 380V。
- (2) 额定绝缘电压:800V。
- (3) 额定电流:水平母线 5000A,垂直母线 1000A。
- (4) 额定短时耐受电流:水平母线 100kA,垂直母线 80kA。
- (5) 额定峰值耐受电流:水平母线 220kA,垂直母线 175kA。
- (6) 防护等级:IP00~IP40。

2.6.2 柜体结构组成

一套成套设备的柜体一般都由固定式、抽出式等类型的柜体组成。在抽出式柜体中,通常将柜体按一定的模数分隔成若干单元。在 QMS 中不同模数的抽出式功能单元如图 3.15-2 所示。

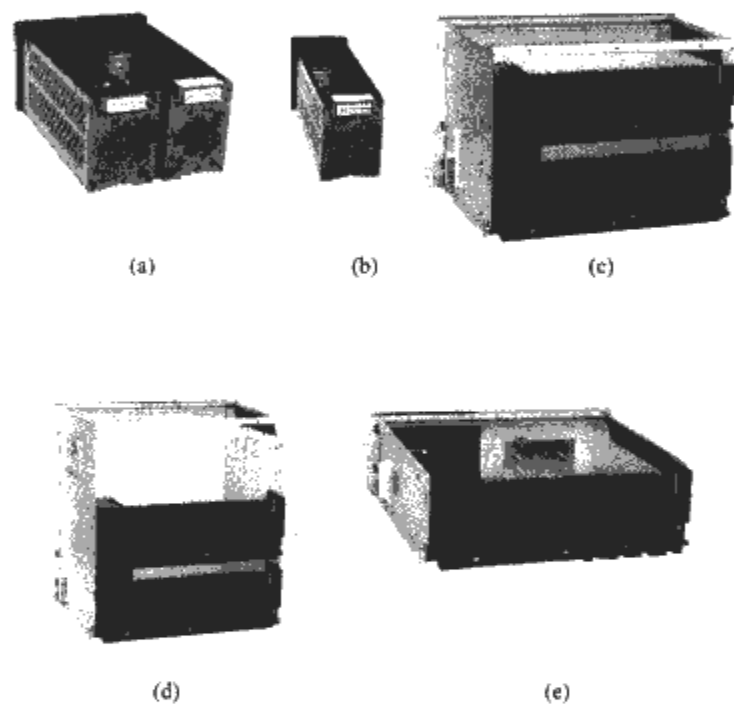


图 3.15-2 抽出式功能单元

- (a) 1/4 模数单元; (b) 1/2 模数单元; (c) 1 模数单元;
(d) 2 模数单元; (e) 3 模数单元

2.6.3 柜架

QMS 的柜架为组合式结构,基本骨架由 C 型型材组装而成,柜架的全部结构部件经过镀锌或直接采用覆铝锌板构成。C 型型材是以 25mm 为模数孔的钢板弯制而成,通过各种连接件,自攻螺丝和 8.8 级六角螺栓连接,框架结构无需专用工具即能组装,具有较高的强度和灵活性。典型的结构如图 3.15-3 所示。

2.6.3.1 柜架材料与结构

成套设备的壳体中柜架与材料是两个基本要素。

2.6.3.1.1 金属材料

(1) 钢材。

- 1) 碳素结构钢。
- 2) 易切削结构钢。
- 3) 热轧等边角钢。
- 4) 等边角钢。弯曲度:等边角钢每米弯曲度不大于 4mm,5 号以上型号的总弯曲度不大于总长度的 0.4%。扭转:等边角钢不得有明显的扭转。

(2) 钢板及钢带。

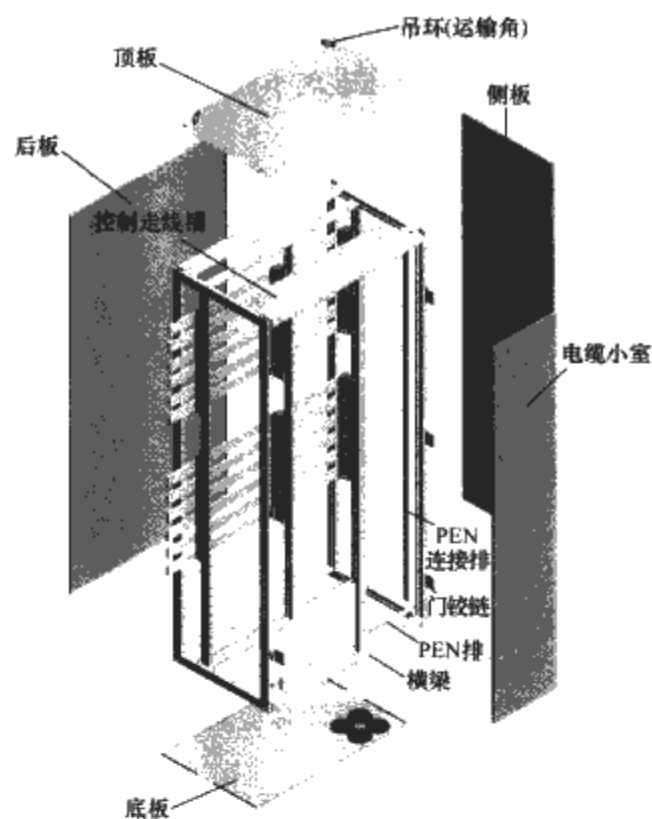


图 3.15-3 柜体结构图

1) 钢板的一般要求:钢板不得有分层,表面不允许有裂纹、结痕、折叠、气泡和杂质,但表面允许有轻微的擦伤和氧化色、酸洗后的浅黄色薄膜和折印;深度或高度不大于钢板及钢带厚度公差 50% 的局部麻点、划伤和压痕。

2) 钢板允许带缺陷交货,但有缺陷部分不得超过每卷钢带总长的 8%。

3) 钢带不得有分层、表面不得有氧化铁皮、铁锈和破裂。

4) 钢带切边边缘不得有裂边、锯齿、撕裂的粗毛刺,不切边钢带的边缘允许有裂边。

2.6.3.1.2 有色金属

(1) 板材。冷轧板材应平直,允许有轻微的波浪。厚度大于 1.5mm 的板材,其长度方向的平面度每米不超过 15mm;厚度 1.5mm 及以下的板材,其长度方向的平面度每米不超过 40mm。

(2) 钢型材。在国内使用的钢结构型材主要有代号 FA、FB、KS、KB、KD 等。型钢每米最大弯曲度 0.75mm,每米最大扭度 < 0.6mm。

2.6.3.1.3 非金属材料

(1) 聚酰胺 66 树脂(尼龙 66 工程塑料)。主要用于制造各种耐磨零件、高强度零件、电气绝缘件。该材料强度高于其他聚酰胺品种,熔点高(238℃),脆化温度低(-35℃)。

(2) 玻璃纤维增强聚酰胺 6 树脂(增强尼龙 6 工程塑料)。可广泛地应用于代替金属、有色金属或嵌入金属件,制作更高强度的耐磨、耐油、高绝缘、高韧性的机械零件,诸如螺母、滑轮、绝缘块、手柄等。比尼龙 6 吸水性、尺寸稳定性、耐热性和绝缘性均更加优良,机械强度也高出一倍以上。

(3) 聚碳酸酯。熔融法聚碳酸酯颗粒度约为 3mm × 3.5mm 的无色或微黄色的均匀透明颗粒。

(4) PC/ABS 塑料。PC/ABS 塑料其力学性能高、流动性好,可成型大型和复杂型制件,如电器插头、插座和接插件,仪表外壳、抽屉面板等塑料结构件。

- (5) 有机玻璃。
- (6) PDGC1 型酚醛层压玻璃布板。
- (7) 3240 环氧酚醛层压玻璃布板。

2.6.4 油漆

(1) C06-1 铁红醇酸底漆。漆膜具有良好的附着力和防锈性能,与硝基、醇酸等面漆结合力好。在一般气候条件下耐久性好,但在湿热条件下耐久性差。

(2) 硝基外用磁漆。漆膜干燥快、平整光亮,耐候性较好。采用砂蜡打磨保养漆膜,可以延长漆膜的使用寿命。主要用于各种金属制品的保护装饰。

3 工艺与造型

3.1 工艺

结构工艺性要求的目的:降低材料和能源的消耗,减少产品设计、生产工艺准备、制造、修理和技术服务时间,提高劳动生产率。因而,结构设计师应具备一定的工艺知识,以使结构设计符合工艺要求。

3.1.1 结构的工艺性设计注意事项

- (1) 材料选择的合理性和经济性。
- (2) 工艺要素的合理性。设计基准、工艺基准、测量基准和装配基准的正确、合理性。
- (3) 加工和装配过程中所采用的各种典型工艺的可行性。
- (4) 装配过程中要避免切削加工。
- (5) 外协加工的可行性和外购件采购的难易程度。
- (6) 结构设计有继承性。尽量选用标准件、公用件和借用件。
- (7) 结构装配、调整和维修的可行性。
- (8) 结构加工和装配过程中,采用新工艺、新技术的可行性,并有助于提高工艺水平和推动工艺技术进步。
- (9) 努力提高结构设计的标准化、通用化和系列化水平。

3.1.2 结构零件工艺性的基本要求

由于各种典型常规工艺有其内在的基本规律,因此采用典型常规工艺方法加工的零件的设计不能违反这些规律,这也是工艺性要求的基本内容。

3.1.2.1 结构零件的切削加工工艺性

- (1) 尺寸公差、形位公差和表面粗糙度的要求应经济、合理。
- (2) 各加工表面的几何形状尽量简单。
- (3) 有相互位置精度要求的表面应尽量在一次装夹加工中完成。
- (4) 零件应有合理的工艺基准,并尽量与设计基准一致。
- (5) 零件的结构应便于装夹、加工和检验。
- (6) 零件的结构要素应尽可能统一,并能使其尽量用普通设备和标准刀具进行加工。
- (7) 零件的结构应尽量便于多件同时加工。

3.1.2.2 零件结构的冲压工艺性

- (1) 零件结构应力求简单、对称。
- (2) 外形和内孔应尽量避免尖角。
- (3) 圆角半径的大小应有利于成型。
- (4) 选材应符合工艺性要求。

3.1.2.3 零件结构的焊接工艺性

- (1) 焊接件所用标准应具有可焊性。

- (2) 焊缝的布置应有利于减小焊接应力和变形。

(3) 焊接接头形式、位置和尺寸应符合焊接规范,以满足焊接质量要求。

- (4) 焊接件的技术要求应合理。

3.1.2.4 零件结构的热处理工艺性

- (1) 对热处理的技术要求应合理。
- (2) 热处理零件应尽量避免尖角、锐边和盲孔。
- (3) 零件截面应尽量匀、对称和平滑过渡。
- (4) 零件材料应与所要求的物理和力学性能相适应。

3.1.2.5 零件结构的锻造工艺性

- (1) 锻造件结构应力求简单、对称。
- (2) 用模锻方法制造的零件应有一定的锻造斜度和圆角半径。
- (3) 锻造件所选材料应具有可锻性。

3.1.2.6 零件结构的注塑及模压工艺性

- (1) 注塑零件的结构应力求有均匀的厚度,尽可能避免过厚和过薄。
- (2) 注塑零件的结构应有一定的脱模斜度。
- (3) 注塑零件的结构应有一定的圆角。
- (4) 注塑零件的结构应避免用大平面作支撑面。
- (5) 注塑零件的结构应尽量减小孔的深度。

3.1.2.7 零件结构的压铸工艺性

- (1) 压铸件壁厚不可过大,并应力求均匀。
- (2) 压铸件应有一定的圆角。
- (3) 压铸件应有一定的斜度以利脱模。
- (4) 压铸件结构应考虑铸造时型芯抽出的方便。

3.1.2.8 装配工艺性

- (1) 应尽量避免装配时采用复杂的工艺装备。
- (2) 质量大于 20kg 的装配单元或组件,应具有吊装结构要素。
- (3) 在装配过程中,应避免拆卸其中的某些部分再重装配。
- (4) 应尽量避免装配过程中的再加工。
- (5) 装配中的连接应运用最少的工具并实现快速装卸。
- (6) 应尽量考虑采用机械化、自动化方法装配。

3.2 造型

3.2.1 功能

功能要求是机械结构造型的主要目的和最基本的使用要求。造型要充分体现功能的科学性,使用的合理性。

3.2.1.1 功能范围

功能范围即为结构的应用范围。一种结构不可能有广泛的工艺性和工作区域,要求过于广泛会造成结构组成复杂,制造困难,成本增高而实际利用率低等缺点。因此,一般结构都按一定的功能范围构成系列结构,这样有利于结构的造型设计和充分发挥其功能特点。

3.2.1.2 工作精度

工作精度是标志同种结构质量性能的高低、反应结构内部质量的主要技术指标,是体现功能的主要因素。造型中要特别注意外观质量与工作精度的适应关系。高精度的结构其外观艺术效果应该是高贵、雅致和精细。因此,要调动可能的工艺手段和艺术手段予以充分表现,使结构的内在质量和外观质量协调。

3.2.1.3 可靠性与有效度

可靠性是表示结构的功能在使用时间上的稳定程度。衡量可靠性的指标“可靠度”是指结构在规定的条件下和预期

的时间内完成规定功能的概率。“有效度”是指可维修结构在某特定的时间内维持其功能的概率。

3.2.1.4 宜人性

宜人性也是反映结构功能的标志之一。结构的功能特点是通过人的使用体现出来,操作使用的合理性、舒适性、安全、工效等一系列问题都反映出结构、造型是否合理,功能是否精良。所以结构功能的发挥不只取决于自身的性能与造型的尺度,使用对象的活动性质与条件,人的生理与心理特点等方面都有密切的关系。因此结构造型设计时,必须以人体工程学的观点去确定人和结构之间最适宜的相互使用方式和方法,提高人的操纵活动能力,以达到高效和高准确度的要求。

3.2.2 物质技术

3.2.2.1 结构

结构方式是表现结构功能的手段,是实现功能的核心因素。结构的高性能、多功能是依靠科学合理的结构方式来实现,正确恰当地选择结构方案是结构造型设计的关键。相同的功能要求可以采用不同的结构方式,不同的结构方式又会直接影响造型的形式,获得不同的外观艺术效果。

3.2.2.2 材料

材料是造型必不可少的物质条件,是满足功能要求,体现结构的基本要素。不同的材料可形成样式不同的结构,所表现的形体式样和获得的外观质感效果也不尽相同。造型的合理选材不仅取决于材料本身的性能特点,还要注意材料的来源,相适应的工艺条件及成本。不切实际的选材不能达到造型要求的预期效果。

3.2.2.3 工艺

工艺方法是实现结构、完成造型的基础手段。结构造型设计不是纸上的设计,必须按造型的要求制作出来。它需要不同的加工工艺方法及工艺条件与之适应。工艺方法对造型的外观质量影响很大,相同的材料和功能要求,采用不同的工艺方法加工,所获得的外部质感及造型的艺术效果是不同的。

3.2.2.4 经济性

经济性是指实现结构造型的生产成本。要求造型的全过程以最少的人力、物力、财力和时间而收到最大的经济效益。经济性制约着造型的结构方式,材料的选用,工艺方法的选择以及其他造型因素,使之更具有合理性。经济性因素是最充分、最全面衡量结构造型的综合性指标。

3.2.3 美学

3.2.3.1 美学原则

机械结构工艺造型主要是在一定的物质技术条件下,为实现功能目的进行形体的构造,造型美。衡量美与不美的基本原则是应用前人多年艺术实践及美学研究所总结出的美学基本原则和规律,即为造型的比例尺度、均衡与稳定、统一与变化。

3.2.3.2 形体构成

艺术造型首先是解决形的问题,进行形体的塑造。造型是依据点、线、面、体等几何要素,按照一定的构成方式、有规律的进行平面或立体构成来实现的。因此,形体的构成及形体对人的知觉及心理作用,都是造型组成必不可少的因素。

3.2.3.3 色彩

任何一个物体必须有“形”和“色”,才能具体地反映它的客观存在。造型美依附于形体的色彩来美化。色彩的功

能及对人的心理和生理上的反应,色彩的配置规律和原则,都是实现造型美的必不可少的因素。

3.2.4 造型的美学原则

美的造型要符合自然规律,不能违背人们的感官快感,其经常是以其鲜明生动的形式(形体)、色彩、质感等给人们以舒服的感受。

3.2.4.1 尺度与比例

尺度是造型对象的整体或局部与人的生理,或人所常见的某种特定标准之间的大小关系。比例是造型对象各部分之间,各部分与整体之间的大小关系,以及各部分与细部之间的比较关系。

美的造型都具有良好的比例和适当的尺度。造型体的比例美,可以是一种用几何语言和数量词汇去表现现代生活和现代科学技术美的抽象艺术形式。正确的比例尺度,是完美造型的基础。

机械结构工艺造型的比例关系是根据功能效用的要求,可能的技术条件,以及材料、结构、时代特征等因素,再结合人们对各种造型的欣赏习惯和审美爱好而形成的。

机械结构工艺造型的比例关系不是固定不变的,随其构成因素的变化、功能的要求、生产工艺的革新、科学技术的发展、欣赏爱好的变化,机械结构工艺造型的比例关系也产生一定的变化。造型的比例尺度只是形式美的一个方面,美的造型必须结合美学因素综合考虑,才能构成完整的造型美。

3.2.4.1.1 尺度

尺度是以人的身高尺寸作为量度标准,它是绝对尺寸或者是与此相互比较所获得的尺寸。所谓“相互比较”是指造型对象与人体高度的比较,或与人所熟悉的零部件,或环境的比较。孤立的零部件往往很难判断出它的体量,但是如果通过与人的比较或者与人所熟悉的环境比较就容易判别它的大小了。

人们经常接触机电产品中的操纵手把、旋钮、操纵台等,虽然产品不同、用途不同、使用者的生理条件和使用环境不同,但它们的绝对尺寸是较为固定的,因为它是与人体功能相适合,往往与机器大小无关,产品再大,手柄尺寸也只能适应于手的大小,如果以产品按比例放大或缩小,就会造成手柄的体量过大或过小的感觉,使这些尺寸失真,结果造成不适合使用要求,同时因尺度失真会造成体量的变化。

3.2.4.1.2 模度理论

模度理论是工艺造型中一种学派观点,它认为美的造型从整体到部分,从部分到细部,都由一种或若干种模数推衍而成。它从人体的尺度出发,更全面地提出了这一理论,把比例与尺度,技术与形式美学作了统一考虑。它通过特定的数值关系,高度概括了这些互相关联而又相互矛盾的比例关系。

模度理论是从人体的绝对尺度出发,选定人的下垂手臂、脐、头顶,上伸手臂四个部位作为控制点,与地面的距离分别为86cm, 113cm, 183cm, 226cm。这些数值之间分别具有黄金比率关系($113/183=0.6175$)和倍数关系(即上伸手臂部位的高度恰为脐部高的两倍, $226/113=2$)。利用上述四个控制点的四个数字,分别插入相应的其他数值,则形成两套费波纳齐级数:第一套为..., 183, 113, 70, 43, 27, 17, ...称为“红尺”;第二套为..., 226, 140, 86, 53, 33, 20, ...称为“蓝尺”。这些数值不仅包含着黄金比例的制约关系,而且大体上能符合人的不同姿态所要求的

高度尺寸。

3.2.4.1.3 比例与尺度的关系

机械结构工艺造型设计中,首先要解决的是尺度问题,然后才能进一步推敲其比例关系。造型如果只有部分之间的良好比例,而没有合理的尺度,是不可能符合使用要求的。

尺度不仅是因使用要求而形成的尺寸的大小,也和人们长期沿用的大小概念有关。因此,改变造型中的某些尺度,首先应认真分析研究与人之间的关系,只有切合实际,才能做到恰如其分,给人以合理的尺度感。

机械结构工艺造型的良好比例和正确尺度,一定要以结构的功能为依据,不能孤立地推敲比例和尺度而忽视这些比例尺度与功能之间的密切关系。尤其应把比例尺度和功能直接相关的有关人体工程学、可靠性技术等问题全面综合的加以研究,才能使造型的比例及尺度完美。因此,一定要依据造型对象的功能、技术和工艺等自身特征中所蕴藏的数比因素,去创造独特的比例和确切的尺度。

3.2.4.2 均衡与稳定

均衡是指造型物各部分之间前后左右的相对轻重关系。而稳定是指造型物上下部分之间的轻重关系。

机械结构是由一定体量、不同材料和结构方式所组成的,它必然表现出自身的重量感,由于工艺造型中所采用的比例、尺度、材料、结构方法、色彩的运用等因素不同,所表现出来的重量感也是不同的,研究和分析造型物的均衡与稳定,就是为了获得造型的完整和安定感。

3.2.4.2.1 均衡

任何静止的物体都要遵循力学原则,保持平衡、安定的条件。因此,造型物的体量关系必须符合人们在日常生活中形成的平衡安定的概念,这里所说的造型的体量关系是指形体各部分的体积,在视觉上感觉到的相互间的分量关系。

机电产品工艺造型的均衡问题,不仅从造型物主体上可以寻求其均衡的各种方式,对于某些机电产品,除主体外还有它的附属装置,因此,在造型时,尤其对于附于主体和靠近主体的附件,应该与主体造型一起综合考虑它的均衡问题。相反,也可以在主体造型产生不均衡感时,运用其附于主体的附属装置去改善整个系统的均衡问题。例如机床的附件之一:电气柜,对于大型的电气柜则应分开置于机床附近,而对于中小型电气柜,一般附于机床主体上,因为它是次要部分,只要在装配、维修方便和不影响操作的前提下,可以适当的改变安置位置,用它去协调和改善机床主体的体量均衡问题。

3.2.4.2.2 稳定

稳定自然界的物体,为了维持自身的稳定,往往靠近地面的部分大而重,上面的部分则小而轻,使重心降低,防止偏倒。

造型中的稳定问题正是解决造型物的上下或大小所呈现的轻重感关系。按照力学原理,稳定的基本条件是物体重心必须在物体的支撑面以内,其重心愈低、愈靠近支撑面的中心部分则其稳定性愈大。

稳定感给人以安详、轻松的感觉,不稳定则给人以不安、动摇、倾倒、危险和紧张的感觉。

在机电产品艺术造型中,其产品由于结构布局和材质选用的不同,各形体部分的实际重量并不是均衡的,它的稳定表现在“实际稳定”与“视觉稳定”两方面。实际稳定是按产品实际质量的重心符合稳定条件所达到的稳定,而视觉稳

定则是以形体的外部体量关系来衡量它是否满足视觉上的稳定感。在造型时,对上述的两种稳定都要同时考虑,才能取得良好的稳定感。

3.2.4.3 统一与变化

机电产品的工艺造型就是要解决结构造型中既有多样变化的艺术效果,又有整体协调统一的艺术形象。因任何物象的美,都表现于它的统一性和差异性之中。完美的造型必须具有统一性,统一可增强造型的条理及和谐感。只有统一而无变化会造成单调、呆板。为了在统一中增强美的情趣和持久性,必须在统一中加以变化,这样可引起视觉的刺激,增强物体形象自由、活跃、生动的美感。

3.3 色彩设计

人的视觉对于色彩敏感性是色彩用于装饰的主观因素,人们在视察物体时,视觉的第一印象是对色彩的感觉,在机械结构造型设计中形、色是两个重要的形式因素,结构的美是综合色和材料美而产生的。

3.3.1 色彩的三要素

人们之所以能辨别自然界五彩缤纷的色彩,首先是凭借光线的照射,没有光线也就没有了色彩。光是一种磁波,色则是人的眼睛受到光的刺激后而产生的一种感觉反应。白色的光线照在三棱镜后通过折射被分解为一条红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七种光谱色带,在色彩学上把红、橙、黄、绿、青、蓝、紫称为标准色,其中红、绿、蓝称为色光的“三原色”。结构造型设计上所指的色彩是颜色而不是色光。

3.3.1.1 色相

色相,顾名思义就是色彩的相貌,又称色泽,也是色彩的名称。标准的色相就是光谱色带中的7种色,若把红、橙、黄、绿、青、蓝、紫首尾相接,围成一环,称为色相环。将此环均等分成12个区域,即表示12种色相,也就是常用的12种颜色。

3.3.1.2 明度

明度又称光亮度或鲜明度,是指色彩的明暗程度。

各种色相间明暗程度不同,即使同一色相也有不同的明度差别。如白、黄明度最高,看起来很亮;而黑、紫明度最低,看起来很暗。介于其中的是红、橙,其余明度相当于兰、绿。

3.3.1.3 纯度

纯度即色彩的鲜艳程度,又称饱和度、彩度、色度。标准色(如正红)的纯度最高,最鲜明。色彩纯度的高低与含标准色成分的多少有关,含标准色多纯度相对的高,色感也强,感觉鲜艳、活泼、刺激;反之,色感弱,感觉稳重、含蓄、柔和。

3.3.2 色彩的功能

色彩是物体受光后反射作用于人的视觉器官,使人的视觉器官引起兴奋传输给神经中枢而产生的色感觉,因而对人会产生大量的生理和心理作用。

机械结构工艺造型色彩与绘画色彩不同之点,就是前者能充分利用色彩的功能进行色彩设计,使人的心理活动和生理活动产生良好的影响,给整个生产活动带来好的效果。

颜色能使观察者产生各种感情,它随观察者自身的主观条件(年龄、性别、爱好、文化艺术修养等)不同,所感知的色彩感情也不同,其中虽然有不少个人的因素,但是共同的社会条件和生活环境也使其具有一般的共性。在设计用色时,应该根据一般人对色彩感知的感情效果

去选择颜色。

3.3.2.1 冷暖感

色彩本身没有寒冷,由于人们在自然现象中得到的印象而引起的联想作用,使人们从客观存在的色彩中产生了“冷”与“暖”的概念。如红彤彤的太阳,红的炉火使人感到温暖;淡蓝色的冰雪,使人感到寒冷。因此,红、橙、黄称为暖色,而蓝、蓝绿、蓝紫为冷色,绿和紫是不冷不热的中性色。白色是冷色,黑色倾向暖色,灰色是中性色。但是,色彩的所谓“冷”与“暖”是物色互相对比出来的概念,这种概念是相对的,即使是红色(如玫瑰色),把它放在蓝色中,会显得较暖,而将它放在橙红色调中,就显得比较冷了。又如紫色相对于红色它显得冷,而与蓝色相比它又较暖。利用色彩的冷暖感环境安放产品,如一般寒带宜用暖色,而热带及高温工作条件宜使用清凉的冷色。

3.3.2.2 轻重感

物体由于表面颜色的不同会使人感到轻重有别。例如表面为白色物体看上去显得轻一些,而黑色表面的物体就显得较重一些。色彩的轻重感主要取决于明度,所以明色(浅色)可以感到轻,而暗色(深色)则感到重。

对于轻重感不明显的颜色,如红与绿,就要视其对颜色的喜爱而异。从物体表面看,喜欢的颜色就觉得轻一些,反之则感到重一些。机械结构色彩设计可利用其轻重感,可将基础部分用深色,上部用浅色,给人一种上轻下重的稳定感。如若相反,则产生头重脚轻感觉。

3.3.2.3 胀缩感

色彩的胀缩感是指色彩在对比过程中,某些色彩的轮廓,给人以胀大或缩小的感觉。这种现象的产生是由于人在观察形体的色彩时,有一种生理上的光渗错觉。浅色物体在人的视网膜上所形成的物像总有一圈光包围着,好像把深色背景下的浅色物体在视网膜上所形成的物像扩大了。

色彩胀缩感的关系:在色彩的对比关系中,暖色、亮色的感觉是胀,而冷色及暗色则有收缩的感觉,因此在色彩配置时要注意不同的色彩对人的面积感是不同的,必须选取适当的尺度关系,以取得面积的等同感。

3.3.2.4 进退感

不同的颜色会引起人们对距离感觉上的差异。色彩的“进”与“退”是指色彩在对比过程中给人的视觉反应,好像是某些颜色“前进”了,而另一些颜色“后退”了。这是色彩对比过程中“隐”或“显”的反映。对比中强的色“进”,而弱的颜色“退”。暖色使人感到“近”,而冷色使人感到“远”。由这一基本关系,可以推论:

(1) 深色底中,色彩的“进退”决定于色彩的冷暖,暖色“进”,冷色“退”。

(2) 浅色底中,色彩的“进退”决定于色彩的明度,深色“进”,浅色“退”。

(3) 灰色底中,色彩的“进退”决定于色彩的纯度,纯度高的“进”,纯度低的“退”。

除此之外,与颜色进退有关的是颜色的凸凹感、厚薄感与虚实感。明度高的暖色有凸出的感觉,明度低的冷色有凹进的感觉。深暗的颜色显得厚实,而浅淡的颜色则显得轻浮。利用这些感觉,来处理造型物的均衡与稳定、主从关系和虚实关系,可以起到很好的作用。

3.3.2.5 色彩的质感

人们认识物质都通过形、色、质三者的统一表现所反映,质是物体固有的性质,色又依附于光而存在,因而色和

光是材料质地特性的表现,而质又是色光表现的条件。色是通过特定物质(物质本色,染料及染色体,涂料)来表现,因此,有色必有质的反映,有质必有色的反映,它们是相依相存。例如,光泽色的金色、银白色就表现了黄金、白银的质地高贵、富丽、辉煌。又如坚硬、细密、光洁的金属面,总联想到的是清晰、明亮、眩光的灰白色。

色彩的质地感觉与色相,明度,纯度密切相关,一般明色、轻色及弱色给人细润,圆滑、丰满的感觉,而暗色、重色及强色给人以粗糙、淳朴、坚实的感觉。

3.3.2.6 软硬感

软硬同样是物质质感的一种表现,质地细腻而坚固的则“硬”,质地轻盈柔和的则“软”。

色彩的软硬感同样取决于色彩的明度与纯度,表现软的色彩应是柔和的,不具有明显的对比,一般采用中等纯度和较高明度的色彩来表现。如掺入白灰色的明浊色即有柔软感,纯色和掺入黑色的暗清色感到坚硬。所以,明浊色柔软,纯色和暗清色坚硬,明清色和暗浊色则居中。无彩色的白色和黑色是坚硬色,灰色是柔软色。

3.3.2.7 明暗感

色彩要素中本身就有明暗的性质,因此它给人必然有明暗感觉。色彩的明暗感与明度有关,但又不完全对应于明度。例如,色环上的蓝绿与蓝色比较,尽管蓝绿色的明度高,然而实际人们感到的是蓝色比蓝绿色还亮。通常不能给以亮感的色是蓝绿、紫、黑;相反,不能给人以暗感的色是红、橙、黄、黄绿、蓝、白等。

3.3.2.8 知觉感

颜色的知觉感,指色彩在人的知觉上引起反应的强弱程度。由此感觉而引起色彩的兴奋与沉静感、明快与忧郁感以及华丽与朴实感。一般来说,暖色和明度高的颜色知觉感强,易引起兴奋。冷色与暗色知觉感弱,具有沉静和忧郁的感觉。而纯度高的红、橙、黄具有华丽的感觉,蓝绿色及明度较低的冷色有朴素而雅致的感觉。除此之外,白色和黑色及高纯度的颜色给人以紧张感,灰色及纯度低的颜色给人以舒适感。设计时要得到强烈的华丽感,可用红色系的颜色;要得到文雅而沉着的感觉,可用蓝色系的颜色。

3.3.3 色彩与情绪

色彩不仅会使人产生冷暖、轻重、远近等物理感觉,而且能引起人的感情变化。例如,有些颜色会使人感情冲动,另一些颜色却使人忧郁懊丧;有些颜色会使人感觉轻松愉快、情绪稳定,另一些颜色则使人情绪紧张,甚至脉搏加快,血压升高,引起疲劳。这就是色彩对人的心理和生理产生了不可低估的影响。

不同的颜色,对人体产生的影响是不同的。例如:蓝色能帮助高烧病人退烧,能使人情绪稳定;紫色有镇静的作用;褐色能升高血压;红色能增加食欲。如人处于红色的房间,时间长了会使其精神错乱。此外,一些明度较高而鲜艳的暖色,容易引起人的疲劳,而一些明度较低的,柔和的冷色,使人有稳重和宁静的感觉。在进行机械结构的色彩设计时,必须重视这些科学的研究成果,加以很好的利用,使结构的色彩不仅有好的艺术效果,还应注意对人的心理生理及健康方面有好的影响,才符合科学以及宜人学方面的要求。

3.3.4 色彩的联想与象征

红色——活力、光辉、积极、热情、兴奋、进步和刚强的表征,在不同情况下有吉祥、危险、引人注意的紧张感觉。

橙色——热情、明亮、温暖、喜悦、轻松、兴奋、堂皇、引起人烦恼和焦躁的感觉。

黄色——素雅、欢乐、光明、愉快、富有、温柔、轻薄、忠义、高贵、豪华等象征，称之为正色（曾是古代中国帝王的国色），但也有枯败、病态的消极感觉。

绿色——青春、生长、少壮、雅致、和平、诚恳及朴实的表征。用以表示欢乐、喜悦、复苏的意味，也有宁静新鲜的感觉。

蓝色——沉着、镇定、宁静、深远、高洁、安详的感觉，但又有悲凉、贫寒、凄凉的感觉。一般象征和平、希望、诚实、善良等。

紫色——高贵、庄严、奢华、神秘、优雅的象征，但也有阴暗、悲哀与险恶的意味。

白色——朴素、纯真、洁净、高雅、明快、真实、光明等象征，但也有寒冷、苍老、衰亡的意味。

黑色——有悲哀、恐怖、绝望、空虚、死亡的感觉，但也有庄重、肃穆、沉重、坚固的感觉。

灰色——有朴素、沉默、镇定、温和、平淡、空虚、忧郁、沉闷、悲哀等感觉。

暖色——表示温暖、热情、急躁、兴奋。

冷色——表示清凉、沉静、温柔、雅致。

亮色——表示明快、活跃。

暗色——表示沉静、庄重。

高纯度色——表示鲜明、活跃。

低纯度色——表示安静、雅致。

3.3.5 色彩的配置方法

3.3.5.1 确定基调色彩

运用色彩调和的原理，使基调色彩有所变化，以加强层次感 and 立体感，并要考虑设备和环境色彩间的协调性。

3.3.5.2 确定面板色彩

面板的基色须与设备的基色相调和和匹配。需按指示进行涂色的应按色标的规定进行涂色。

3.3.5.3 确定装饰件、铭牌及其他附件的色彩

装饰件、铭牌及其他附件色彩的选择，应以基调色彩为依据，用色彩对比、平衡和调和的方法来处理，尽量少用明亮色，以减少眩光对人眼的刺激。装饰色彩的色相不宜过多，以免使人感觉紊乱或繁杂。

3.3.6 机械结构色彩的选择原则

3.3.6.1 考虑电控设备造型的总体效果

“形”和“色”是产品造型的重要构成要素，色彩对产品“形”的表现效果有着直接的影响，甚至决定着产品外观造型美与不美的标志。同一“形”的产品，如果采用不同的色彩，效果也不同。电控设备的色彩既考虑到产品的外观美，又考虑到适应操作者的心理与生理要求，尽量使“形”和“色”协调，并以“色”助“形”，使电控设备赋色生辉。

3.3.6.2 满足人机协调的要求

如前所述，色彩对人的生理和心理都是有一定作用的。由于电控设备一般与人接近，被人操作，所以要求电控设备的色彩应对人无不良的刺激，为操作者创造一个宜人的色彩环境，给操作者以亲切、舒适、轻松、明快和精神饱满的感觉，从中得到美的享受。故而要求机械结构的色彩应有利于人机关系的协调，选择色彩时宜用低明度、低纯度、无反光的色调。

3.3.6.3 满足产品的功能要求

色彩与产品功能的关系，就像色彩在装饰画中形式与内

容的统一一样，是作品成功的条件，也是应用效果的标准。在选择色彩时，要从产品的功能要求出发，尽量使产品的功能与色彩的功能特点一致，以求更有利于产品功能的发挥。有的产品由于功能的特殊要求，对色彩设计的美学要求是次要的，而产品功能要求是主要的。例如，消防车的色彩是红色的，原因是红色注目性高，远视效果强，心理效果紧张，容易使人联想到“火”、“危险”而主动让开道路，使其迅速通行，从而达到迅速灭火的目的。这样，对消防车就不能再强调它的配色美。

对于电控设备，一般说来，固定安装在工作气氛平静，比较讲究的环境中，要求操作者既要思想集中，又不要过度紧张，因此色彩的选用不宜过于刺激和兴奋，但又不要过于沉闷，应当使操作者在工作期间感觉心情愉快。故而选用低纯度，明度不太高，又比较鲜艳，冷暖适中的色调为宜，以防止操作者心神不安。

3.3.6.4 要适应时代的要求

产品的色彩，随着时代的前进，科学技术的迅速发展，社会环境的变化，人们的审美标准也在改变。也就是说不同的时代，具有不同的审美标准。在设计机械结构的色彩时，也应参考符合时代特征的“流行色”。所谓流行色，是为了适应人们的爱好的变化而产生的具有新奇性的色彩，是在某一时期特别引人注目的宜被广泛使用的色彩。例如，20世纪50~60年代，科学技术比较落后，工业不太发达，人们普遍喜爱纯度、明度都较低，色相偏冷的色彩，如蓝色、灰色等。而现代，人们喜爱一些明度、纯度较高，色相偏暖的色彩，那些淡雅、明快的色调越来越为人们所欢迎，如果绿、豆绿、浅蓝、米黄等色彩。

总之，流行色不是一成不变的，进行产品的色彩设计时要注意调查研究国内外产品的基本色调，熟悉同类产品所采用的色彩格调，只有这样，才能投其所好，出奇制胜。除此之外，还要根据审美标准的变化及科学技术发明所提供的新型涂料等因素，进行色彩预测，为新产品造型的色彩设计提供切实可行的依据。

3.3.6.5 要符合不同国家、地区及民族对色彩的不同好恶

由于政治、地理环境、民族、宗教信仰、文化教育、风俗习惯等因素的不同，对色彩的好恶自然也不尽相同，这是客观存在的，应予以充分考虑。电控装置也有不少出口产品，设计色彩时应参照前述的各国对色彩的好恶进行选择，还要运用配色规律和美学法则，结合市场趋势等各种因素来组成统一协调的效果，这样才能使产品色彩为人们所喜爱。

3.3.6.6 应考虑涂漆工艺

机械结构的色彩设计不同于绘画，不能只管色彩的配制，还应充分考虑其配色方案是否便于工人喷涂操作。否则再好的方案也难于实现。在两个以上的色彩配置时，要注意分色面的选择部位，一般应在部件之间的结合处，或在盖板、面板、罩壳等明显分界处分色，这样简单易行，达到经济合理的效果。

3.3.6.7 推荐选用的主体色

由于审美要求的不同，对色彩的好恶和评价也不同。但大体说来，机械结构的主体色宜采用纯度低，且明快、雅致、洁净的色彩来统一全局，使其主调明确，整体统一，再配以小面积高纯度高调色进行点缀，以使总体色彩丰富、变化、有生气。主体色采用低纯度的主色调，应是比较明朗、鲜艳、略带灰调子的色彩为主。例如，以绿色为基调的色彩，有豆绿、果绿、苹果绿、湖绿、翠绿等。此外，还有乳

白、米黄、乳黄、淡兰等色彩。当然,选用纯度较高、明快适中的色彩也可以,但需要配以明度高的其他强调色来提高活跃感、丰富整体色彩效果。

4 柜体的散热与通风

4.1 机柜结构散热与通风的设计原则

- (1) 柜进风口要大于风道进风口,建议比值为 15:1。
- (2) 柜进风口要低于风道进风口。
- (3) 在柜进风口和风道进风口之间,不应有明显的障碍物和发热器件。
- (4) 出风口必须和风机配合设计,并尽可能放置于柜体顶部。
- (5) 柜体出风口,即风道上风口应距风机进风口有一定距离,一般应为 100~200mm,使风道中的风在截面上尽可能均匀。
- (6) 对柜体内无风道的强迫风冷,特别要注意进风口位置和大小的设置,它的设置对冷却效果有极大的影响。
- (7) 当柜体无防护等级要求,而柜底又没有进线电缆地沟时,柜体可不要底板,也不需要单独设计进风口。
- (8) 当柜体的防护等级达到 IP50,在进风口需加设进风网板过滤时,就要加大进风口的面积,以保证风机的需要,不可使柜内造成负压状态,而不利于散热。必要时要在进风口安装风机,强迫进风以保证冷却需要。
- (9) 当设计较大的并联风道、特殊风道时,或当设备内无风道而又有多处热源时,柜体设计要和内部设计一起进行,并有效地互相配合。

4.2 自然风冷散热的结构设计

- (1) 自然风冷散热的设备内部空间应比较宽敞,有较大的散热空间。
- (2) 设备应有足够的顺畅的空气通道。
 - 1) 设备下部设进风口。如设备无底板及有地沟,可单独设进风口。
 - 2) 设备上部设出风口。采用不加顶盖、顶盖支起、顶盖冲各种网孔等,而且进出风口尽可能要和柜体防护等级一致。
 - 3) 设备内部的发热器件尽可能放置在设备上部,便于散热,并可避免热量影响其他部件。
- (3) 通风口位置。当有很重的发热部件(大变压器)必须放置在下部时,则应使其上部有较大的空间或空气通道必要时应将热量引开,另设出风口排气。

4.3 强迫风冷散热与通风的结构设计

4.3.1 结构组成

强迫风冷散热适用于中等功率设备的散热,一般设备功率在 7000kW 以下。

功率柜主要由主电路的元器件、散热器、风道、风机及联接母线组成。元器件和联接母线由电路已经确定,结构设计任务是将散热器、风道和风机,科学、合理地组合成强迫风冷系统,进而完成功率柜的设计。

由于所选择的散热器的材质、型式、大小的不同,风道的组成型式不同,风机的型式、风量、风压的不同,就使结构组合呈现多样化,也使冷却效果成为系统中多种参数的函数。合理的选型、设计计算、样机实验、修改、定型等过程是达到理想效果的必然途径。在实际应用中,由

电路系统确定了器件的格局。由设计或选型确定了散热器和风道大小之后,最后变更的是风机的参数。变更风机的型式(轴流、离心或涡流)、型号(风量、风压)往往可以达到理想的效果。

4.3.2 风道设计

风道是形成强迫风冷散热的重要组成部分,在散热器设计或选定后,风道的基本尺寸也就确定了。风道的设计是和风机的选型配合进行的。风道的型式和尺寸决定风的流向、风速的大小,并决定风冷散热的效果。风道的形式多种多样,一般常用的有两种:串联风道和并联风道。

4.3.2.1 串联风道

串联风道是指将发热器件的结构单元重叠封闭放置时(一般取上下重叠),只形成一个进风口,一个出风口,风流依次冷却器件的风道。主要特点:

- (1) 结构简单,可用标准单元构件组成风道,也可设计整体式风道。
- (2) 占用空间小。
- (3) 效果良好。

4.3.2.2 并联风道

并联风道是指将发热器件的结构单元并列放置时,风流同时经过每个单元的风道。主要特点:

- (1) 冷却均匀。风流由进口进入后,流经每个单元到达出口时,各单元流经的风量、风速、温度都是相等的,故冷却均匀。
- (2) 风阻小。只有单层单元的风阻。
- (3) 散热效果好。

4.3.2.3 选用方法

两种风道使用的都很普遍。

- (1) 发热器件功率损耗较大时,如单只元件实际电流大于 1000A 时,选用并联风道较多。效率高,并且均匀。
- (2) 并联风道占用空间较大。整体并联风道要用较大的轴流风机,体积、噪声都较大,同时往往要和柜体一起设计,由柜体组成风道。
- (3) 中等功率的设备(7000kW 以下)使用串联风道较多。结构紧凑,并且简单。

4.3.2.4 设计注意事项

(1) 风机的风量、风压要和风道的设计相适应。串联风道中,每层散热器的风阻(散热器进出风口的压差)都使风速降低,影响散热效果,所以,在串联层数较多时(>6 层),应考虑使用风压较大的离心式风机。在完全封闭的串联风道中,在总风量不变时,各层的风速应相等。此时,进口处的空气温度低,而出口处的温度高,即对下层的散热效果好,而对上层的散热效果差,同时,空气随温度的升高而膨胀,更不利于上层的散热。实际上,在实测时,串联 4 层的风道,进口风速为 1.5~2m/h 时,出口风速可达 4m/h 左右。这是因为各层均有补充的冷空气进入风道。这些补充的风量,改变了理论上的风速和风压的变化规律,使散热效果得到改善。有效的办法还是通过具体的风道具体的散热器,具体的风机进行试验确定。并联风道本身的进风口面积较大,风阻较小,要使每个单元都流经同样风速、风温的风量就要采用大风量的轴流风机。

(2) 散热器肋片的方向要和风道中风流的方向一致。

(3) 无论何种风道,为提高风速,增强散热效果,都可以在抽风式的进风口或吹风式的出风口设置挡风板,迫使风量集中于散热器。

(4) 无论何种风道,风进入风道后首先要冷却散热器,

不可被其他发热器件阻拦。

(5) 风道可以设计成整体式也可以设计成单元组合式。设计要有利于风速的流畅和有效，风道内部尽可能光滑，在保证电气间隙和爬电距离的要求下，尽可能避免风

短路。

(6) 要处理好进出风道的带电母线的绝缘设计。过线孔隙可以是补充风量的进风口，它以结构的合理为主来完成。

第16章 低压成套辅助设备

1 简述

低压成套辅助设备是低压成套开关设备和控制设备不可缺的组成部分,是影响成套设备电气功能、性能与控制产品质量、可靠性的关键因素。

1.1 成套辅助设备

成套开关设备和控制设备是由一个或多个低压开关设备和与之相关的控制、测量、信号、保护、调节等设备,由制造商(生产厂)负责完成所有内部的电气和机械连接,用结构部件完整地组装在一起的一种组合体。由此而知,低压成套开关设备和控制设备的设计、组装、生产的关键技术是“连线 and 组装”,这种“连线 and 组装”需要借助某些部件来完成,统称这些部件为“辅件、辅助件”。又因为这些部件是为低压成套开关设备和控制设备服务的,也可冠以“成套辅助设备”。成套辅助设备在其他相关类似产品,如仪表、继电保护、电力电子设备等行业也有着广泛应用。

成套辅助设备在新中国成立后开始发展,当时的产品类别很少,外观质量也较差。直至1978年,在全国不同地区定点了近20个工厂,开始全面设计生产电气辅件称之为八大类(接线座、连接器、端头、配线件、标记、符号、专用工具、安装件、复归件等)产品。随着成套设备的进一步发展和国外技术的创新、引进,直到20世纪末期,全行业完成了第三次创业,涌现出一大批技术先进、新颖的电气辅件,大体上可将其分成电气接线辅件、电气配线辅件、结构辅件三大类。

(1) 电气接线辅件。包括接线端子排、连接器(接插件)、铜制压接端头(裸端头、预绝缘端头)各种接线方式(压接、卷压接、绕接、夹接、焊接)的接线工具,本章重点介绍压接和夹接。

(2) 电气配线辅件。包括行线槽、捆线带、缠绕管、保护带、保护圈、绝缘套、吸盘、线夹、符号牌、标记牌、接线号。

(3) 结构辅件(包括接线和/或同时起结构作用的辅件)。包括门锁、铰链、手柄、通风窗、空气过滤器、吊环、顶板释压装置、铆接螺母、活动螺母、组装壳体用各种零部件、母线框(架)、眉板、电缆管接头、敲落孔用胶圈和结构型材等。

1.2 在成套设备中的重大作用

由于电气辅件安装于柜内、设置在柜内、外电气连接的关键部位——进、出线处,除需要保证连接可靠外,还有安全要求。需保证具有防直接接触电的保护和防间接接触电的保护能力,如接线端子排通过安装轨安装在成套设备中安装轨必须与成套设备外壳保护导体之间保持不大于 0.01Ω 的接地电阻,以确保成套设备保护导体的连续性,从而实现防间接接触电的保护。在各类端子排的设计时,要确保使用中的端子排,不能发生直接接触电的危险。

1.3 技术内涵广阔

由于考虑到电气辅件在成套设备中的工作环境,制造电气辅件的材料绝大部分为塑料材料,这些塑料包括热塑性塑料及热固性塑料:有酚醛类,也有PVC类、尼龙类、聚酯类、及乙烯类等,因此对辅件用塑料材料需提出基本要求,制定了JB/T 8458—1996《电气设备辅件塑料制品一般要求和试验方法》。因为电气辅件是安装在成套设备中,如正常工作条件、介电性能要求与成套设备一致。其他共性要求还有耐交变湿热、耐低温、耐温度变化、耐开裂浸泡、耐拉力、着火危险、弯折、相比漏电起痕指数、文字符号耐久性检查等。设置的目的,也是保证其功能、性能及可靠性。此外电气辅件的生产属于大批量生产,因此要在每一批次产品中需抽样检查。抽样,执行GB 2828的规定,其合格判定水平要随产品的复杂程度趋于严格。欧洲及北美对电器用塑料制品的环保与污染提出了更高的要求(欧盟BOHS指令、EEC条款和美国UL要求的六种禁止使用的有害物质、镉、铅、汞、六价铬、多溴联苯、多溴联苯醚等)。随着我国电气辅件产品进入国际市场。满足和符合这些要求是不可少的。介绍这些要求也是本章的内容。

1.4 发展前景

在各种接线辅件中,以导体的直接连接技术应用的最广泛,而在各种接线辅件的使用和产量最大的是接线端子排、连接器(接插件)、端头(线鼻子)。直到20世纪末,出现了母线无孔连接技术。它是专用于成套设备和配电工程中母排布线,母线与分支母线快速无孔连接的连接件。其特点是工艺简单,连接可靠、接触面积大,成本低廉,节能降耗,显然这是一种可推广的新技术。以后随着无孔母线连接的应用,出现了一种母排适用技术(也称元件表面安装技术)。它是将低压电器元器件,如刀开关、刀熔开关设计成能直接安装在母线上的安装形式,可做到同时完成安装、支撑与电气连接两个功能(对元件来说,可做到电缆进、母排出,母排进、电缆出)。若安装其他元件,如塑壳开关,可以配用一种专用的转换连接器。这种母线适用技术在成套设备中的推广应用,带来了技术革命性变革,出现了采用母线适用技术的电器元件和配电柜(箱)。

随着成套设备电流等级的增大和新型安装方式的出现,引入了大电流端子(截面积为 $50\sim 300\text{mm}^2$,电流为 $160\sim 630\text{A}$)。这种端子的优点是:提升了端子的电流等级,还可实现分线(包括电缆不切断分线——绝缘移位技术),组态灵活,实现防火设备用、铜—铝过渡,较强的热稳定能力,短路强度达 $120\text{A}/\text{mm}^2$,另一值得注意的发展是大电流端子采用了绝缘移位技术(刺破式),并且这种移位技术已经向小截面延伸。

2 用途与分类

由于低压成套辅助设备产品的品种规格众多,多年来有八大类分类法。之后,因为用途、功能、安装类别、工作原

理的不同及产品的发展, 低压成套辅助设备的分类发生了变化。这里以常用的接线、配线、结构三大类作为分类 (见图 3.16-1)。

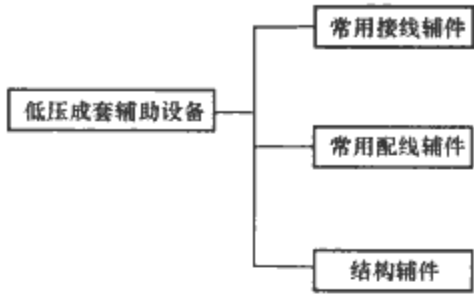


图 3.16-1 辅助设备的分类

(1) 常用接线辅件如图 3.16-2 所示。

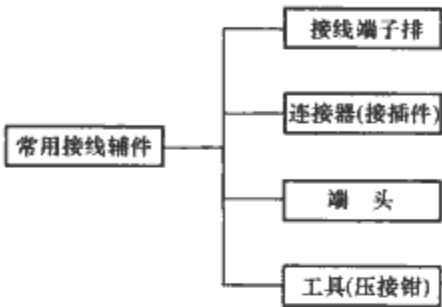


图 3.16-2 接线辅件的分类

(2) 常用配线辅件如图 3.16-3 所示。

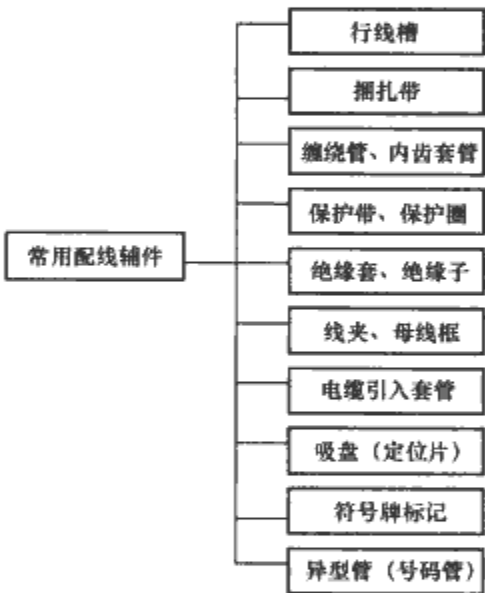


图 3.16-3 配线辅件的分类

(3) 结构辅件如图 3.16-4 所示。

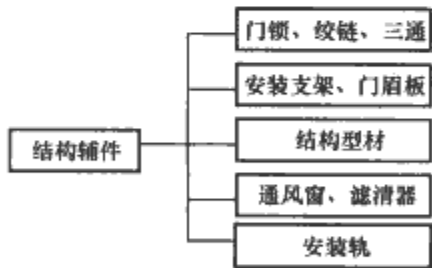


图 3.16-4 结构辅件的分类

3 主要技术参数

3.1 电气辅件产品的标准体系

电气辅件的主要技术要求列于国标和行业标准中：

(1) 国家标准有：

GB 14048.1—2006 (IEC 60947—1: 2001, MOD) 《低压开关设备和控制设备 第 1 部分：总则》

GB/T 14048.7—2006 (IEC 60947—7—1: 2002, MOD) 《低压开关设备和控制设备 第 7-1 部分：辅助器件铜导体的接

线端子排》

GB/T 14048.8—2006 (IEC 60947—7—2: 2002, MOD) 《低压开关设备和控制设备 第 7-2 部分：辅助器件铜导体的保护导体接线端子排》

(2) 行业标准有：

JB/T 4261—1999 《低压成套开关设备和控制设备 辅件术语》

JB/T 9659.1—1999 《低压成套开关设备和控制设备用接线端子排 第 1 部分 组合型和底座封闭型接线端子排》

JB/T 2436.1—1992 《导线用铜压接端头 第 1 部分：0.5~6mm² 导线用铜压接端头》

JB/T 2436.2—1994 《导线用铜压接端头 第 1 部分：10~300mm² 导线用铜压接端头》

JB/T 6330—1992 《TG1 型管状端头》

JB/T 8457—1996 《冷挤压压接钳的一般要求和试验方法》

JB/T 8458—1996 《电气设备辅件塑料制品一般要求和试验方法》

JB/T 9660—1999 《行线槽》

JB/T 9665—1999 《低压成套开关设备和控制设备辅件产品型号编制方法》

JB/T 10263—2001 《低压抽出式成套开关设备和控制设备辅助电路用接插件》

JB/T 10316—2002 《低压成套开关设备和控制设备用母线架》

JB/T 10323—2002 《低压抽出式成套开关设备和控制设备主电路用接插件》

JB/T 56187—1994 《接线座产品质量分等》

下面从主要型号及主要名词术语、辅件的主要技术要求、辅件的主要结构要求、辅件的主要绝缘性能要求、辅件的主要塑料材料要求等几个角度，分类介绍上述标准，以便较系统了解标准，与贯彻应用。

3.2 名词术语

(1) 辅件，辅助件 (auxiliaries)。开关设备和控制设备内部元器件之间以及外部电路之间的电连接所需用的元件的总称，包括接线、保护、紧固等器件以及为标记、指示所需要的线号、符号等器件。

(2) 接线端子排 (terminal block)。具有一个或多个彼此绝缘的接线端子组件，且预定装在支架上的一种绝缘组件。

(3) 连接器，接插件 (connectors)。用以端接导体的元件，它与相应的配对元件进行插合和分离，使电路通断。

(4) 端头 (terminals)。配置在导线端部的器件，用以保证机械的和电气的连接性能。

(5) 配线件 (wiring products)。为实现控制设备以及其他电气装置内部布线而使用的一些产品的总称。一般包括行线槽、捆线带、缠绕管、接线号、保护带、线夹、网状管等产品。

(6) 符号牌 (symbol plates)。为了操作、维修方便，以文字、数字、字母等做指示的平面标牌。

(7) 附件 (accessories) 供用户安装、调整和使用产品所必须的专用工具和检测仪表，成为产品完成多种功能 (用途) 必需的，而又不能同时装配在产品上的组成部分。

(8) 专用工具 (special tools)。为保证电连接的安全可靠及布线，拆接方便而使用的特殊工具的总称。

3.3 接线端子排的主要特性及技术要求

3.3.1 接线端子排的特性

3.3.1.1 接线端子的形式

接线端子的形式有两种：一种是螺纹形，另一种是非螺纹形。螺纹形又分直接压接和间接压接两种，非螺纹形有焊接、快速连接、绕接、绑接、夹接、插接等。

3.3.1.2 导线连接方式

(1) 未经处置的导线端。在接线前仅将其切断并剥去末端绝缘层的一种未经处置的导线端。

(2) 经过处置的导线端。导线末端焊接接线片或在末端压接端头等的一种经过处置的导线端。

3.3.1.3 额定值和极限值

- (1) 额定电压。
- (2) 短时耐受电流。
- (3) 标准截面积。
- (4) 额定截面积。
- (5) 额定接线能力。

3.3.1.4 标志

- (1) 应具备字迹清晰、经久耐用的标志。
- (2) 便于识别的制造厂名称或商标。
- (3) 识别接线端子排的型号，以便据此从制造厂和其他产品目录中查到有关数据。
- (4) 符合的标准的编号。

3.3.1.5 附加资料

下述内容应标明在接线端子排（如果接线端子排的位置允许的话），或列入制造厂的技术数据手册中，或标注在包装件的标签上。

- (1) 额定截面积。
- (2) 额定接线能力，包括可同时连接的导线根数。
- (3) 额定绝缘电压。
- (4) 额定冲击耐压。
- (5) 使用条件。

3.3.2 接线端子排的主要结构要求

(1) 应在确保可靠的机械连接及电接触的条件下才能允许接入导线。

(2) 在规定的机械性能试验（弯曲试验、拉出试验）条件下应能承受由于接入导线可能被施加的力。

(3) 不应通过除陶瓷（或特性不比陶瓷差的其他材料）以外的绝缘材料传递接触压力，除非金属部件中有足够的弹性以补偿绝缘材料可能产生的收缩。

(4) 接线端子排的结构

- 1) 螺纹形（通过螺钉头直接压紧和通过中间部件间接压紧两类）。
- 2) 柱式（直接压力的、间接压力的）。
- 3) 螺栓形。
- 4) 鞍形。
- 5) 接线片式。
- 6) 套形。
- 7) 非螺纹形。

3.3.3 性能要求

(1) 温升：接线端子的温升不得超过45K。

(2) 介电性能：接线端子应能承受规定的介电试验；试验电压值按 GB 14048.1—2006 的规定。

(3) 额定短时耐受电流：接线端子排应能承受1s额定短时耐受电流120A/mm²。

(4) 电压降：试验前电压降不得超过3.2mV，试验后不得超过试验前测量值的150%。

(5) 非螺纹形接线端子排的老化试验：每个接线端子排每经过24次温度循环之后，以及完成192次温度循环之后，测量电压降，每次测定时的温度保持20℃±5℃。不应出现电压降超过4.8mV或第24次循环后测得的电压降的1.5倍。

3.4 电气辅件的塑料件材料要求

3.4.1 正常工作条件

(1) 周围空气温度：上限+40℃或+55℃，下限-5℃、-25℃或-40℃。

(2) 污染等级：3级。

(3) 安装类别：Ⅱ类或Ⅳ类。

(4) 海拔：不超过2000m。

3.4.2 塑料件技术要求

塑料件要求进行一般检查和外形尺寸检查并符合生产图样规定，还规定如下技术要求：

(1) 着火危险性能。

1) 为使制品符合性能要求，其原材料允许添加填充材料。阻燃性制品应满足着火性能要求，其性能指标、试样数量、安装方法、严酷等级应在产品中规定。

2) 按 GB/T 5169.4 规定的灼热丝试验方法时，试验温度为650℃、750℃或960℃，具体选值由产品标准规定。试验持续时间 $t_a=30s$ ，灼热丝移去后30s内熄灭，即 $t_e=t_a+30s$ ，而周围零件或下面铺底层又未完全烧着。

3) 当制品采用 GB/T 5169.5 针焰试验方法时，试验火焰施加持续时间为5s、10s或20s，具体选值由产品标准规定。火焰移去后，燃烧的持续时间应少于30s。

4) 当制品采用 GB/T 5169.7 本生灯型火焰试验方法时，试验火焰尺寸：试验A（火焰高度为20mm）、试验B（火焰高度为125mm）、试验C（火焰高度为175mm）。试验火焰施加持续时间：试验A为5s、10s或25s；试验B为15s、30s或60s；试验C为10s、30s或60s；具体选值由产品标准规定。燃烧器的倾斜角为45°，火焰移去后，燃烧的持续时间应少于30s。

(2) 相比漏电起痕指数（CTI）。一般不小于175，CTI值为175、250、400或600，具体选值由产品标准规定。试验后，试样应达到其相应的选值。

(3) 介电性能。应能承受1min、50Hz介电性能试验。

(4) 耐交变湿热。按 GB2423.4 进行交变湿热试验，高温温度40℃，周期数2d或6d，试验后，绝缘电阻不小于1.5MΩ，并无击穿或表面闪络现象。

(5) 耐低温。制品应能承受低温温度：-10℃、-30℃、-45℃，试验时间：2h、16h、72h的低温试验，试验后，试样应无裂纹、脆断等现象。

(6) 耐温度变化。

1) 低温温度（℃）：-10，-30，-45。

2) 高温温度（℃）：70，85，100，125，155。

3) 高温、低温保持时间：各30min。

4) 高温、低温交换时间：2~3min，循环次数5次。

5) 试验后，试样应无变形、裂纹等现象。

(7) 耐开裂浸泡。采用聚碳酸酯（PC）材料制造的制品应能承受四氯化碳试剂溶液浸泡3min的浸泡试验。试验后，试样应无裂痕及破损等现象。

(8) 耐拉力。对需承受拉力的制品，必须进行耐拉力试

验，试验后无裂纹或断裂，具体拉力值由产品标准规定。

3.4.3 塑料材料的环保与防污染要求

根据我国法律和国际上各国的有关环保的法律法规要求，在欧洲及北美对电器用塑料制品的环保与污染提出了更高的要求（欧盟 BOHS 指令、EEC 条款和美国 UL 要求中禁止使用的六种有害物质镉、铅、汞、六价铬、多溴联苯、多溴联苯醚—多溴二苯醚等）。随着我国电器辅件产品进入国际市场，满足和符合这些要求是不可少的，我国也正在准备执行中。表 3.16-1 给出欧洲及北美对重金属及阻燃添加剂材料的限值。表 3.16-2 给出欧洲及北美和各国给出的污染物的存在监督范围，其中一些要求与辅件有关，如导电件的铅及其化合物，阻燃剂的多溴联苯 PBB 和多溴二苯醚 PBDE 等。

表 3.16-1 欧洲及北美对重金属及阻燃添加剂材料的限值

序 号	项 目		限值 (mg/kg)
1	镉 Cd		2
2	铅 Pb		2
3	汞 Hg		2
4	六价铬 CrVI		2
5	多溴联苯 定量分析	一溴联苯	5
		二溴联苯	5
		三溴联苯	5
		四溴联苯	5
		五溴联苯	5
		六溴联苯	5
		七溴联苯	5
		八溴联苯	5
		九溴联苯	5
		十溴联苯	5
	多溴联苯 醚（多溴 二苯醚） 定量分析	一多溴联苯醚	5
		二多溴联苯醚	5
		三多溴联苯醚	5
		四多溴联苯醚	5
		五多溴联苯醚	5
		六多溴联苯醚	5
		七多溴联苯醚	5
		八多溴联苯醚	5
		九多溴联苯醚	5
		十多溴联苯醚	5

表 3.16-2 欧洲及北美给出的污染物的存在监督范围

序号	有害物质	用 途	备 注
1	铅及其 化合物	焊料	铅在电气设备中的主要用途之一（铅含量 85% 的除外）
		玻璃如阴极射线管 玻璃金属密焊灯具等	用于阴极射线等电器元件（第四元器件和荧光灯所用玻璃中的铅除外）
		陶瓷器件，如雅典 陶瓷器件、某些电解 质器件	器件中的铅可能存在于陶瓷中，但不是用于器件焊接端的涂层
		易 加 工 的 钢、 铝、铜	指令对这些合金中铅含量做出具体规定
		电池	铅酸电池电磁指令中的铅含量佐料具体规定
		作为稳定剂或颜料 用的塑料	

续表

序号	有害物质	用 途	备 注
2	镉及其 化合物	油漆	干燥剂颜料
		作为稳定剂或颜料 用的塑料	在镉的指令中（91/338/EEC）已被禁止使用
		焊料	少有
		厚膜电路和陶瓷中	已经逐步停止在它们的制造工艺中作为添加成分使用
		电接触器	广泛用于继电器和开关
		电池	镉镍电池，电池指令中允许使用
		半导体如硫化镉被 用于光敏期间和新型 太阳能电池	指令中禁止使用铬基太阳能的太阳能动力设备
3	汞及其 化合物	电池	电池指令中（91/338/EEC）限制使用
		电接触器	继电器微型开关倾角传感器
		荧光灯	指令的例外，荧光灯中限制汞的含量
4	六价铬化 合物 Cr6	钝化膜	各种金属表面的薄涂层，用于裸露金属以及改善油漆和其他涂层的附着力
		耐蚀油漆和涂层	油漆和涂层的添加成分
		镀硬铬	用于形成涂层，但铬极板是不含有的金属
		镀金属膜塑料用的 塑料腐蚀剂	涂层前用于腐蚀塑料，但不出现在最终产品中
5	多溴联苯 PBB	阻燃剂	有多种溴化阻燃剂
6	多溴二苯 醚 PBDE	阻燃剂	有多种溴化阻燃剂

4 常用接线辅件

接线辅件是电气设备内部进行电器连接的辅件产品总称，一般包括铜导体的接线端子排（以下简称接线端子排）、连接器（接插件）、铜制压接端头（以下简称端头）等。

4.1 接线端子排 (terminal block)

具有一个或多个彼此绝缘的接线端子组件，且是预定安装在支架上的一种绝缘组件。原名称为“接线座”，为与 IEC 60947-7-1 标准和国家标准术语统一，改名为“接线端子排”。

接线端子排主要用于电气设备内部接线、分线，以及内外导线之间的电连接等，接线端子排的型式很多，其型号编制规定如下。

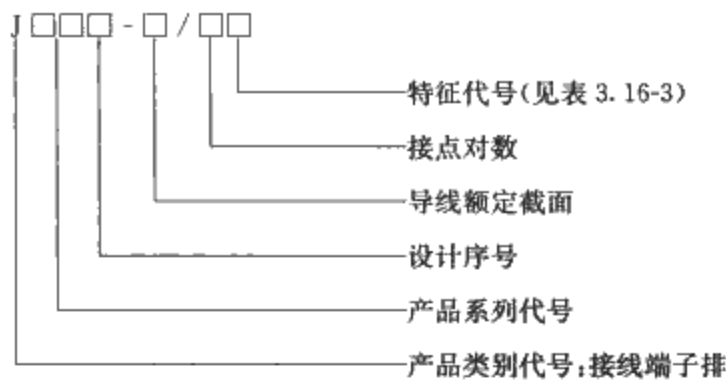


表 3.16-3 型号编制中的特征代号

基型	试验型	联络型	试验联络型	开关型	熔断器型	接地型	标记型	隔板
—	S	L	SL	K	RD	JD	B	G

国内已有的接线端子排型式有 JH□组合型、JF□底座封闭型、JZY□专用型、JT□直通型，还有企业未按行业标准规定进行型号编制的产品，如 JYL□、JYH□、JWD□等。接线端子排的品种有基型、试验型、联络型、开关型、熔断器型、接地型、零线型等，电位型、特殊型、标记型、终端型、分线型、T 接型、光电耦合器型、继电耦合器型等。接线端子排连接额定截面积 (mm²) 导线的规格有 0.2、0.34、0.5、0.75、1.0、1.5、2.5、4、6、10、16、25、35、50、70、95、120、150、185、240、300 等 21 个规格。接线端子排的额定截面积与额定接线能力之间的关系 (见表 3.16-4)。表 3.16-4 中 AWG 指的是美国线规。

表 3.16-4 接线端子排的额定截面积与额定接线能力之间的关系

额定截面积		额定接线能力	
mm ²	AWG	mm ²	AWG
0.2	24	0.2	24
0.34	22	0.2~0.34	24~22
0.5	20	0.2~0.34~0.5	24~22~20
0.75	18	0.34~0.5~0.75	22~20~18
1	—	0.5~0.75~1	—
1.5	16	0.75~1~1.5	20~18~16
2.5	14	1~1.5~2.5	18~16~14
4	12	1.5~2.5~4	16~14~12
6	10	2.5~4~6	14~12~10
10	8	4~6~10	12~10~8
16	6	6~10~16	10~8~6
25	4	10~16~25	8~6~4
35	2	16~25~35	6~4~2

注 AWG 为美国导线规格。

4.1.1 组合型接线端子排

用带导电部件的独立单元装配在一起，组成所需要电路数的一种接线端子排。完整的装配需要终端隔板，如图 3.16-5 所示。组合型接线端子排的种类很多，其中有筒式组合型接线端子排、螺钉式组合型接线端子排、弹簧式组合型接线端子排等。

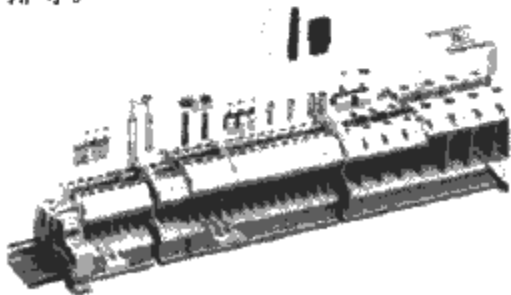


图 3.16-5 组合型接线端子排

4.1.1.1 筒式组合型接线端子排

筒式组合型接线端子排的特点是与导线连接的接线端子呈框状或管状外形，依靠螺钉直接或间接地把导线夹紧，接线端子的型式为螺纹型，如图 3.16-6 所示。这种接线端子排的厚度较薄，例如，1.5mm² 普通接线端子排厚度仅为 4.2~5mm，2.5mm² 普通接线端子排厚度仅为 5.2~6mm，在同样长的安装轨上可以安装较多的接线端子排。接线时，导线端最好压接 TG 型 (管状) 端头后再与接线端子连接，这样可增加接线的可靠性。安装时选择 TH 型或 G 型安装轨，装卸方便。

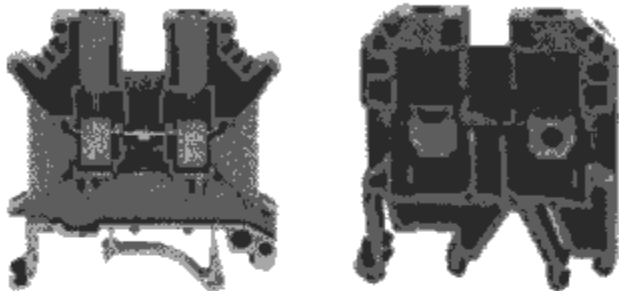


图 3.16-6 筒式组合型接线端子排

4.1.1.2 螺钉式组合型接线端子排

螺钉式组合型接线端子排的特点是采用组合螺钉和导电板与导线进行连接，依靠螺钉直接或间接地把导线夹紧，压接强度大、接线部位清晰可见、接线直观。接线端子的型式为螺纹型，如 3.16-7 所示。接线时，导线端可压接 TU 或 TO 型端头后与接线端子连接，便于接线和维修，接线可靠。安装时选择 G 型或 TH 型安装轨，装卸方便。



图 3.16-7 螺钉式组合型接线端子排

4.1.1.3 弹簧式组合型接线端子排

弹簧式组合型接线端子排特点是与导线连接的接线端子呈笼式弹簧外形，依靠弹簧直接或间接的将导线夹紧，如图 3.16-8 (a) 所示，接线端子的型式为非螺纹型，是通过笼式弹簧完成电连接的，这种接线端子排除具有筒式组合型接线端子排的优点外，更重要的是连接质量不需考虑人为因素，即与操作人员的施力大小无关，只需用工具的尖端插入开口处，弹簧保持打开状态，插入导线，抽出工具，导线即被牢固地夹紧，如图 3.16-8 (b) 所示。它的缺点是 35mm² 以上的导线连接不能选用。

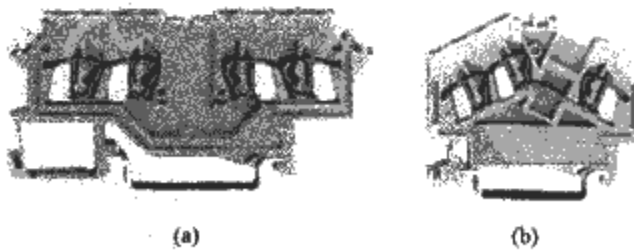


图 3.16-8 弹簧式组合型接线端子排

4.1.2 底座封闭型接线端子排

由一个或几个电路组成，有一个封闭的绝缘底座，不允许导电部件或导线通过安装面。这种接线端子排的特点是有

一个封闭的绝缘底座，安装一般不需要安装轨，直接安装在底板或支架上，体积小、占空间位置小。为了维修及方便装卸也有需要安装轨进行安装的，如图 3.16-9 所示。接线方式有筒式压接和螺钉式压接两种，导线端必须压接不同的端头后再与接线端子连接，接线方便，接触可靠。



图 3.16-9 底座封闭型接线端子排

4.1.3 专用（功能）型接线端子排

一个专用型接线端子排包括附加的导体连接件和专用功能（如隔离开关、电路保护、整流器、放大器、变压器、信号灯、电位器等功能）。

专用型接线端子排是为满足成套装置的需要，方便用户使用，增加接线端子排的用途而开发的，许多系列的接线端子排中都有专用型接线端子排，如开关型（仅起隔离开关作用）、熔断器型、试验型、试验联络型、接地型等。熔断器型接线端子排内装石英砂熔芯，可以安装在短路容量 50kA 的回路中起保护作用，有的熔断器型接线端子排上还装有发光二极管，当熔芯熔断时发出灯光报警信号，如图 3.16-10 所示。试验型接线端子排可作外接电流表、电压表用，以校验控制柜上电流表性能，如图 3.16-11 所示。接地型接线端子排具有单回路和多回路的接地功能，如图 3.16-12 所示。将上述较为简单的专用型接线端子排编入了组合型接线端子排和底座封闭型接线端子排的系列产品中，方便用户选用。



图 3.16-10 熔断器型

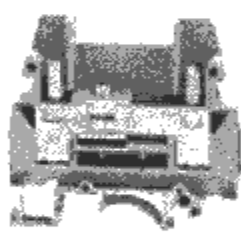


图 3.16-11 电表式

专用型接线端子排还有零线型接线端子排、光电耦合型接线端子排、继电耦合型接线端子排、抗干扰型接线端子排等产品。零线型接线端子排是接线端子与零（中性）母线相连接，通过母线将零线各点连为一体的接线端子排，如图 3.16-13 所示。光电耦合型接线端子排是利用普通接线端子排加装电子器件，实现光电传输耦合，使输出信号在电气上隔离，同时具有信号指示等功能，如图 3.16-14 所示。继电耦合型接线端子排是在普通接线端子排的基础上添加电子元器件实现数字信号输入/输出耦合。使信号的隔离、转换、不占用其他任何空间直接通过接线端子排来实现，如图 3.16-15 所示。抗干扰型接线端子排是在普通接线端子排上加装电子器件，静态保护交流回路，通过接线端子排可排滤

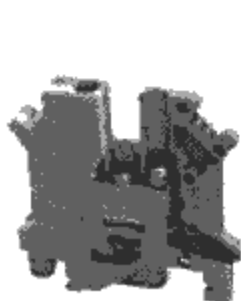


图 3.16-12 接地型



图 3.16-13 零线型

去“噪声”干扰，用内装的滤波电容，实现抗干扰功能，如图 3.16-16 所示。专用型接线端子排国内品种还不多，以后将根据成套装置的需要继续开发电位器型、电阻型、整流器型、电压变换型、电流变换型等。

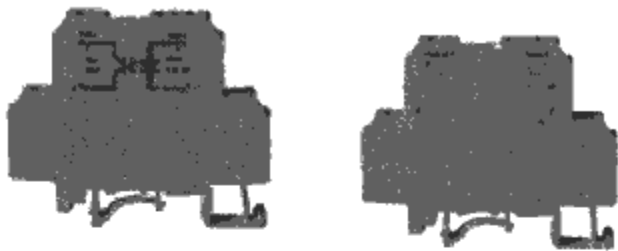


图 3.16-14 光电耦合型 图 3.16-15 继电耦合型

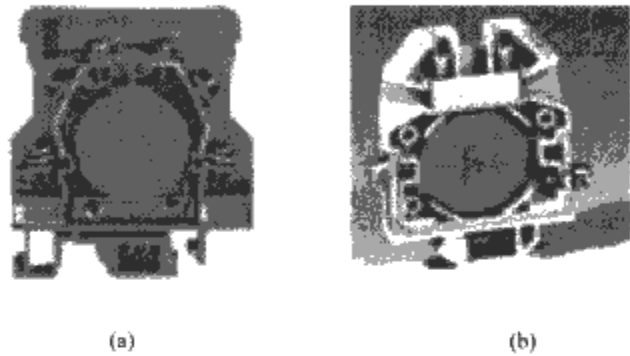


图 3.16-16 抗干扰型

抗干扰型端子有两种。图 3.16-16 (a) 接线端子的连接点贯通成环形，图 3.16-16 (b) 接线端子的连接点则不贯通，它们内装能吸收干扰脉冲的电容器。应当说，功能型接线端子排是今后的发展方向。

4.1.4 直通型接线端子排

由一个或几个电路组件，导电部件一直穿过安装面，绝缘件可以穿过也可以不穿过安装面。直通型接线端子排是随着控制技术数字化、微电子技术和电力电子技术及器件的智能化，使得控制设备由十几个、几十个单元变化为几块甚至一块大板。印刷板上采用的焊接—压接、焊接—插接、焊接—绕接型接插件（连接器）已由直通型接线端子排替代，接线端子排的特点是体积小、接线密度大，如图 3.16-17 所示。接线方式有焊接—压接、焊接—插接等。压接端有筒式压接和组合螺钉压接两种，接线方便，接触可靠。



图 3.16-17 直通型接线端子排

4.1.5 连接多根导线的端子排

4.1.5.1 绝缘移位连接

绝缘移位连接是一种快速可靠的连接技术。所谓绝缘移位，是指在连接时依靠导电件端部的锋利部，在压力的作用下，将绝缘外包划破、露出导线芯线。这就是使靠近芯线的绝缘外包移开技术。

(1) 使用绝缘移位连接技术，无需剥线、手动工具操作、不使用螺钉、免除操作者重复性的劳动，连接可靠，可实现多导线连接，既允许在同一线框里压接 2 根相同截面的导体，而且可做到压接第 2 根导线与压接第 1 根导线同样方便容易。

(2) 带有绝缘移位连接的接线端子排，只选择两侧却无

需剥线的连接，也可选择一侧为绝缘移位连接，另一侧是普通螺钉连接方式。

(3) 抗振动、耐腐蚀，随着刺穿导线绝缘层、绝缘移位连接推动导线进入正确位置。线夹和端子架均牢固地夹装导线，导线无金属部分外露，具有极好的防腐蚀能力。

绝缘移位连接的缺点是接线端子的截面只有 6mm² 以下的。

导电机理：利用导电夹锋利的端部（刀刃）首先将压进的带绝缘导线的绝缘外皮刺破，再利用线夹入口处的较窄间隙和特殊的几何断面形状（类似园、扇、三角形），施加一个挤压的反力，将多股导线束压实，实现导体与线夹的可靠连接，达到使电路接通的目的。并且随着导线夹进导线夹，虽然绝缘被刺破，但导线除去被刺破处有裂缝实现导线与线夹的连接外，导线其余绝缘部分未被破坏，一方面可保证导线外露部分继续实现绝缘功能，另一方面在绝缘层裂缝处由于绝缘材料的弹性作用还可紧紧地将线夹夹住不留任何缝隙，形成比较良好的绝缘。

4.1.5.2 螺钉卡箍连接端子

双螺钉卡箍连接端子是德国汉森公司用于接线盒中的专用接线端子，也可用于成套设备中。它符合 GB 7251.1 要求的“将两根或多根导线连接到一个端子上只有在端子是为此用途而设计的情况下才允许”的特殊要求，可以用于同一端子接两根导线，它有 2 个接线框，分别有 2 个压紧螺钉，分别压紧导线互不影响其各自的压紧力，并且卡箍随着螺旋向下紧固，卡箍也向上提升在夹紧的过程中有向下的螺旋力，也有向上移动的卡箍的反作用力，是一种非常有想象力的设计，连接牢固，使用可靠。

4.1.6 接线端子排的选择

本节介绍的接线端子排根据标准规定，通常，一个端子上只能接一根导线，只有在端子是为此用途而设计的情况下才允许将两根或多根导线连接到一个端子上（见 GB 7251.1）。

4.1.6.1 按接线端子排的正常工作的条件

接线端子排的正常工作的条件：周围空气温度上限为 +40℃，下限为 -25℃；安装地点的海拔不超过 2000m。

在正常工作条件下，按下列条件选择：

- (1) 接线端子排的额定电压不低于装置的额定电压。
- (2) 接线端子排的额定截面不低于所在回路连接导线的截面。

接线端子排铭牌标志的参数有连接导线的最大截面积值、导线截面与对应的电流值见表 3.16-5。接线端子排标志的截面值，允许连接导线的最小截面值可降两个级别使用，如 JH2-2.5 的接线端子排，能可靠地连接 2.5mm²、1.5mm² 和 1.0mm² 的导线，依次类推。

表 3.16-5 接线端子排的额定截面

额定截面积 (mm ²)	0.2	0.34	0.5	0.75	1	1.5	2.5	4	6	10	16
试验电流 (A)	4	5	6	9	13.5	17.5	24	32	41	57	76
额定截面积 (mm ²)	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	
试验电流 (A)	101	125	150	192	232	269	309	353	415	520	

4.1.6.2 具体选择原则

(1) 同一尺寸的成套装置内部安装元件较多、接线密度大的宜选用筒式或弹簧式接线端子排。

(2) 同一尺寸的成套装置内部安装元件较少、接线密度不太大的情况下宜选用螺钉组合型接线端子排。

(3) 当成套装置中有诸如插件箱、调速器、变频器等独立安装单位的控制装置时，接线需要过渡性转换，如单股线变为多股线，焊接连接转变为压接连接或插接等。独立安装单位的配线与接线需单独完成后再与装置连接，这时宜选用底座封闭型接线端子排。

4.1.6.3 按成套装置使用的场合、环境条件选

(1) 当成套装置使用在振动环境条件下时，例如：机车、轮船、大型工程机械等，宜选择弹簧式组合型接线端子排。使用在船上的接线端子排应有 CCS 产品认证标志。

(2) 当成套装置使用在特别潮湿的环境中时，如在煤矿或有盐雾的场合，宜选择 TH 型（三防）接线端子排。

4.1.7 接线端子排与端头及冷压接钳的匹配选择

接线时，接线端子排与端头及冷压接钳应匹配，如成套装置中控制线路的导线为 2.5mm²，那么接线端子排、端头及冷压接钳口都应选用 2.5mm² 规格。如果成套装置中控制线路的导线有 2.5mm²，也有 1.5mm² 的，为了装置内部的整齐、美观，统一选用 2.5mm² 的接线端子排，那么 1.5mm² 导线端部应采用 1.5mm² 的冷压接钳口压接，端头压接后与接线端子排连接，这样方能保证连接的可靠性。应该注意的是接线端子排降级使用时最多只能降两个等级。

4.1.8 应用中简单的检查和技术要求

为确保成套装置产品质量，在设计和制造选型时，需要注重如下技术要求。

(1) 导电部件是否为紫铜或黄铜，紧固螺钉是否存在滑扣或拧不紧的缺陷。

(2) 取一个绝缘件用明火燃烧，明火离开后，检查绝缘件上的火焰是否在 30s 内熄灭，如能自熄，说明接线端子排阻燃。

(3) 对于采用聚碳酸酯制造的接线端子排，使用前可取一个或几个绝缘件放入盛有四氯化碳的容器中浸渍 3min，不出现裂纹说明绝缘件的内应力很小，使用过程中不会出现问题。

表 3.16-6 列出不同厂家的型号对比仅供参考。

表 3.16-6 不同型号端子排对照表

序号	华通型号	菲尼克斯型号	端 板	标记号	连接件菲尼克斯	跨界桥接件
1	JH30-2.5B	UK2.5B	JH30-1.5G	ZB6	JFB10-4	ISSB10-6
2	JH30-2.5	UK3N	JH30-2.5/10G	ZB5	JFB10-2.5	ISSB10-5
3	JH30-4	UK5N	JH30-2.5/10G	ZB6	JFB10-4	ISSB10-6
4	JH30-6	UK6N	JH30-2.5/10G	ZB8	JFB10-6	ISSB10-8
5	JH30-10	UK10N	JH30-2.5/10G	ZB10	JFB10-10	ISSB10-10
6	JH30-16	UK16N	JH30-16G	ZB10	JFB10-16	
7	JH30-35	UK35N		ZB10	JFB10-35	

续表

序号	华通型号	菲尼克斯型号	端 板	标记号	连接件菲尼克斯	跨界桥接件
8	JH30-35B	UK35N		ZB10	JFB10-35	
9	JH30-50	UKH50		ZB10	JFB10-50	
10	JH30-6S	URTK/S	JH30-6S/G	ZB8	JFB10-6S	
11	JH30-E	E/UK		ZB8		
12	JH30-4/2-2	UDK4	JH30-4/2-2G	ZB6	JFB10-4	ISSB10-6
13	JH30-4K	UKS-MTK-P/P	JH30-4/2-2G	ZB6		
14	JH30-2/2	UKK3	JH30-2.5/4G	ZB5	JFB10-2.5	
15	JH30-4/2	UKK5	JH30-2.5/4G	ZB6	JFB10-4	
16	JH30-4RD	UK5-HESI		ZB8		
17	JH30-10RD	UK10-DRHESI		ZB10		
18	JH30-2.6B/JD	USLKG2.5N		ZB6		
19	JH30-2.5/JD	USLKG3N		ZB5		
20	JH30-4/JD	USLKG5N		ZB6		
21	JH30-6/JD	USLKG6N		ZB8		

4.2 连接器（接插件）

用以端接导体的元件，它与相应的配对元件进行插合和分离，使电路通断。连接器的型式很多，国内已有的连接器有 LY□印制板型连接器、LG□固定型连接器、LZ□自由端型连接器等品种，其型号编制如下：

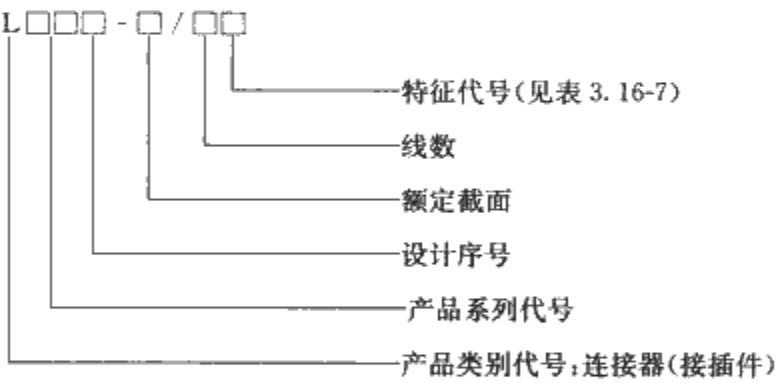


表 3.16-7 连接器（接插件）特征代号

接点间距	备 注
J（后带数字表示）	如：J2.5，间距 2.5mm

4.2.1 印制板型连接器

便于与印制电路板连接的一种专用连接器。印制板型连接器的特点是将连接器的一端固定在印制电路板面上另一端固定在与其进行连接的导线或电缆上，进行插合和分离的连接作用，如图 3.16-18 所示。

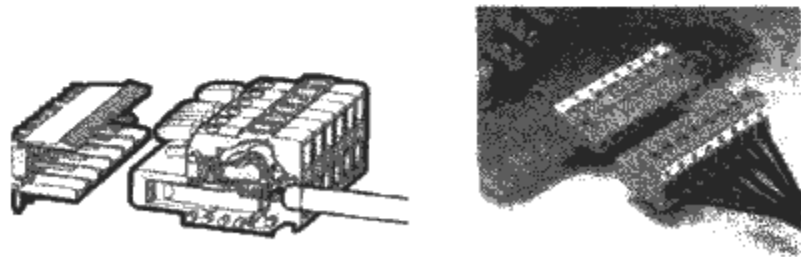


图 3.16-18 印制板型连接器

4.2.2 固定型连接器（接插件）

固定型连接器的特点是将连接器的一端固定在硬质板面上，另一端固定在与之进行连接的抽屉上，进行插合和分离

的连接作用。固定型连接器国内有低压抽出式成套开关设备和控制设备主电路用接插件（以下简称一次接插件），低压抽出式成套开关设备和控制设备辅助电路用接插件（以下简称二次接插件）。

4.2.2.1 一次接插件

一次接插件主要用于低压抽出式成套开关设备和控制设备中，做主电路的电气连接之用。产品的规格品种有 160A、250A、400A、630A，产品相与相之间的中心距与成套开关设备中垂直母线的中心距相同，其中心距分别为 60mm、55mm。外壳采用优质不饱和聚脂模压塑料 DMC 制成，强度高、绝缘性能优良、阻燃性好，如图 3.16-19 所示。

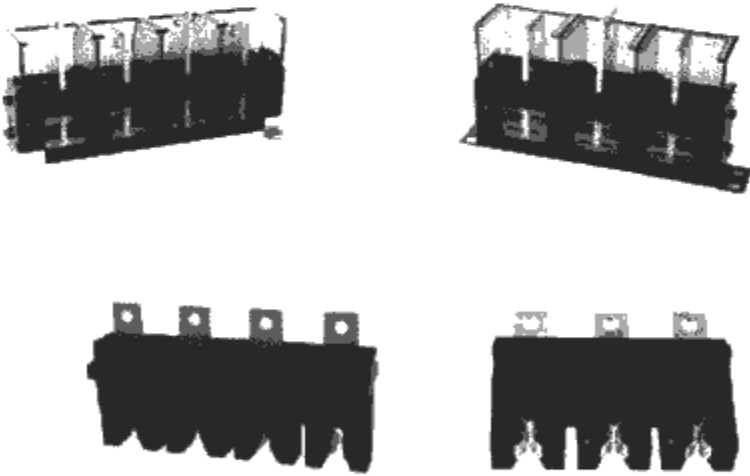


图 3.16-19 一次接插件

4.2.2.2 二次接插件

二次接插件主要用于低压抽出式成套开关设备和控制设备中，作辅助电路的电气连接之用。二次接插件采用封闭式结构，安全可靠。RC1、RC2 带有自动导向装置，能方便、准确插入及拔出。RC3 将安装支架改为自动调节式结构，缩小安装尺寸，并有面板安装方式和底板安装方式供选择。

4.2.2.3 技术要求

(1) 低压抽出式开关设备和控制设备主电路用接插件。此类接插件应符合 JB/T 10323《低压抽出式开关设备和控制设备主电路用接插件》的要求。它包括温升、介电性能、耐湿热性能、短路耐受强度、插入力和拔出力、CTI、绝缘件着火危险性能、耐老化、耐热、机械寿命等。

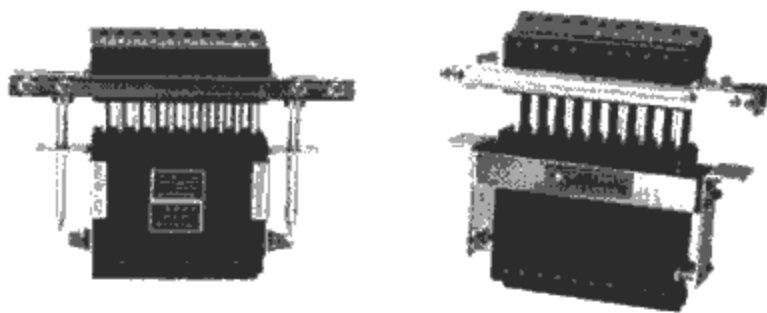


图 3.16-20 二次接插件

(2) 低压抽出式开关设备和控制设备辅助电路用接插件。此类接插件应符合 JB/T 10263《低压抽出式开关设备和控制设备辅助电路用接插件》的要求。它包括绝缘件着火危险性能、相比漏电起痕指数、耐热、机械强度、耐振动、机械寿命、介电性能、耐湿热性能、电压降、温升、耐老化等。

4.2.3 自由端型连接器

装接在导线或电缆自由端的连接器。自由端型连接器的特点是将连接器的一端固定在导线或电缆上，另一端固定在与其进行连接的导线或电缆上，进行插合和分离的连接作用，如图 3.16-21 所示。



图 3.16-21 自由端连接器

4.2.4 连接器（接插件）的选择

- (1) 连接器的正常工作条件：周围空气温度上限为 +40℃，下限为 -25℃，安装地点的海拔不超过 2000m。
- (2) 在正常工作条件下，按下列条件选择：
 - 1) 连接器的额定电流、电压不低于所在回路的要求。
 - 2) 连接器的接点数要与所在回路的接点相同。
 - 3) 连接器的接点间距与所在回路的间距一致。

连接器铭牌标志的参数有额定电流、接点数、接点间距，如 LY2-3/21J5，即印制板型连接器第二次设计，额定电流 3A，接点 21 线，接点间距 5mm。连接器接线端子部分的技术要求应符合 GB 14048.1—2006 规定。

4.2.5 应用中简单的检查和技术要求

为确保成套装置产品质量，在设计和制造选型时，需要注重如下技术要求：

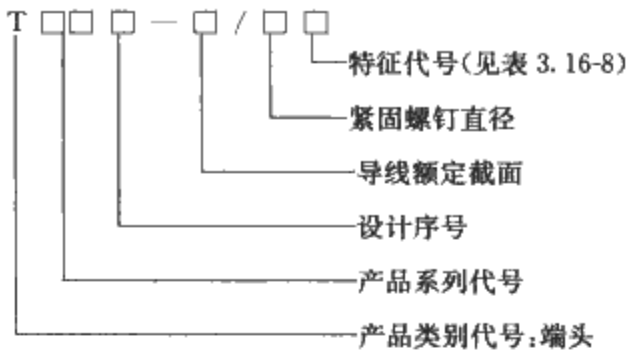
(1) 连接器使用前取一个绝缘件用明火燃烧，明火离开后，检查绝缘件上的火焰是否在 30s 内熄灭，如能自熄，说明连接器阻燃。

(2) 对于采用聚碳酸酯制造的连接器，使用前可取一个或几个绝缘件放入盛有四氯化碳的容器中浸渍 3min，不出现裂纹说明绝缘件的内应力很小，使用过程中不会出现问题。

4.3 端头

配置在导线端部的器件，用以保证机械的和电气的连接性能。端头有两种，一种是裸端头，即压接部位不带绝缘的端头；另一种是预绝缘端头，压接部位带绝缘的端头。端头的型式很多，其型号编制如下。

表 3.16-8 端头特征代号	
带绝缘套	矩 形
JT	J



端头分两部分，0.5~6mm² 为第 1 部分，10~300mm² 为第 2 部分。第 1 部分的端头型式有 TU 型、TUL 型、TO 型、TC 型、TJ 型、TZ 型、TL 型。端头的规格有 0.5mm²，1.0mm²，1.5mm²，2.5mm²，4mm²，6mm²，第 2 部分的端头型式为 TO 型。端头的规格有 10mm²，16mm²，25mm²，35mm²，50mm²，70mm²，95mm²，120mm²，150mm²，185mm²，240mm²，300mm²，12 个规格。TU 型和 TO 型端头为最常用的端头。

4.3.1 TU 型端头

与外电路连接部位在轴向方向呈开口形的端头。TU 型端头的特点是压接导线后的端头与电器连接时，电器上的连接螺母不需从电器上卸下，只要拧松几扣就可以将端头插入，然后拧紧螺母。导线就被牢牢的固定在了电器上。接线方便，接触可靠。如图 3.16-22 所示。

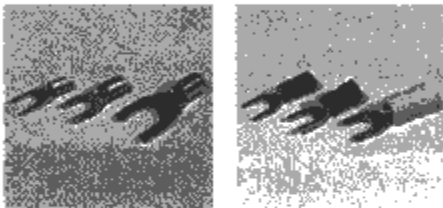


图 3.16-22 TU 型端子

这种端头只适用于 6mm² 以下的导线使用，因为大截面的导线拉力大，TU 型端头有可能被从电器上拉出。

4.3.2 TO 型端头

与外电路连接部位在轴向方向呈封闭形的端头。TO 型端头的特点是压接导线后的端头与电器连接时，电器上的连接螺母必须从电器上卸下，然后将压接导线的端头放入螺钉上将螺母拧紧，导线就被牢牢的固定在了电器上，接触可靠，接线牢固，如图 3.16-23 所示。这种端头适用于 0.5~300mm² 的导线使用，连接可靠。



图 3.16-23 TO 型端子

4.3.3 TUL 型、TC 型、TJ 型、TZ 型、TL 型端头

TUL 型端头是前部带钩的 TU 型端头，TUL 型端头使连接更可靠。TC 型端头是与外电路连接部位呈 C 形的端头。TJ 型端头是与外电路连接部位呈 J 形的端头。TC 型和 TJ 型端头可作为测试端头使用也可以作普通端头使用。TZ 型端头是与外电路连接部位为针状的端头，TZ 型端头适用于接线方式为筒式压接连接。TL 型端头是将两根或多根导线连接在一起的端头。除此之外还有 TT1 插套型端头，如图 3.16-24 所示，TP1 插片型端头如图 3.16-25 所示。以上几种端头只适用于 6mm² 以下的导线使用。

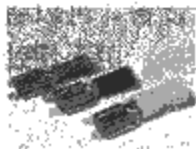


图 3.16-24 TT1 插套型端头

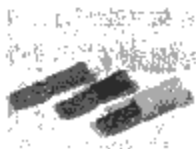


图 3.16-25 TP1 插片型端头

4.3.4 端头的选择

端头的材质为 GB 5231 标准中 TU2 牌号的无氧紫铜带。端头的外观尺寸必须符合 JB/T 2436.1 和 JB/T 2436.2 的规定。

4.3.5 应用中简单的检查和技术要求

- (1) 端头压接所使用的压接钳钳口、导线和端头必须相匹配。
- (2) 将压接导线后的端头固定在一个不可移动的连接处，用手使劲拉，如果拉不出，便可以安全的使用。

4.4 专用工具

冷压接钳主要用于把导线和端头（如 TO 型、TU 型、TZ 型端头等）冷压接在一起，使端头及导线产生塑性变形达到永久性的连接，接触电阻小，安全可靠。使用时钳子、端头、导线三者必须相匹配才能可靠的连接。冷压钳的形式很多，图 3.16-26 所示为其中用的较多的手动及液压式，其型号编制如下：

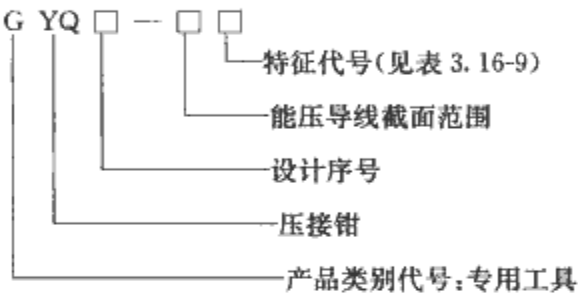


表 3.16-9 冷压钳特征代号

手动式	电动式	气动式	液压式	压预绝缘式
—	D	Q	Y	YT



图 3.16-26 冷压接钳

4.4.1 规格尺寸

冷压接钳的规格尺寸以产品使用说明书为准。

4.4.2 冷压接钳的选择

- (1) 冷压接钳必须符合相应的产品标准规定。
- (2) 冷压接钳应有自锁装置，当压接过程中行程达到限度后，自锁装置松开保证压接的可靠性。

4.4.3 应用中简单的检查和技术要求

- (1) 冷压接钳所压接的端头、导线必须相匹配，应是同一行业规定的标准端头和导线。
- (2) 压接端头后的导线，如有条件按标准做拉力试验合格后可以安全使用。如没有拉力试验设备，可以将压接导线后的端头固定在一个不可移动的连接处，用手使劲拉，如果拉不出，便可以安全的使用。

5 常用配线辅件

配线辅件是为实现控制设备以及其他电气装置内部布线

而使用的一些产品的总称，一般包括行线槽、捆线带、缠绕管、保护带、保护圈、符号标记、打号机等。

5.1 行线槽

为布线提供通道的长槽形或长圆形塑料制品。行线槽的全套部件可为电气设备内部的布线提供各种各样走线方式的选择。电气设备采用行线槽布线，便于电路的变更或维修，同时也可以避免电缆脱落。行线槽的品种有开槽式行线槽、圆孔式行线槽、分隔式行线槽，其型号编制如下。

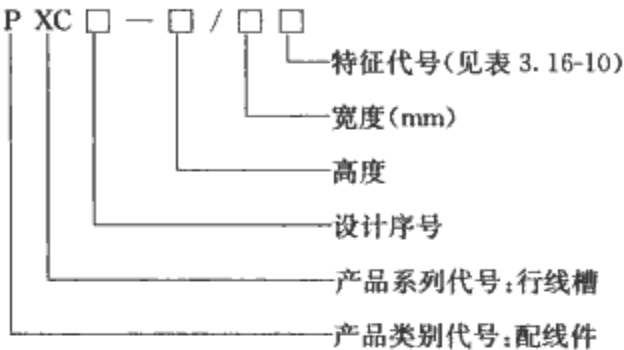


表 3.16-10 行线槽特征代号

槽体侧壁冲通槽	槽体侧壁冲封闭孔	分隔槽体
T	K	F

国内常用的行线槽为 T 型行线槽（PXC₃ 型），如图 3.16-27 所示。行线槽采用聚氯乙烯材料挤塑而成，其正常使用温度为（-5~+40）℃，主要适用于 50Hz（或 60Hz）电压 1200V 的电气设备中进行布线，并对敷于其中的导线起机械防护和加强电气保护之用。行线槽的安装方式，借助固定件直接安装在底板上或安装在金属支架上。行线槽的优先采用的规格见表 3.16-11。行线槽的长度（L）一般有 500mm，600mm，800mm，1000mm，1200mm，1600mm，2000mm 七种，也可根据用户需要的长度进行供货。此外还有 PZC 装潢型（见图 3.16-28）。

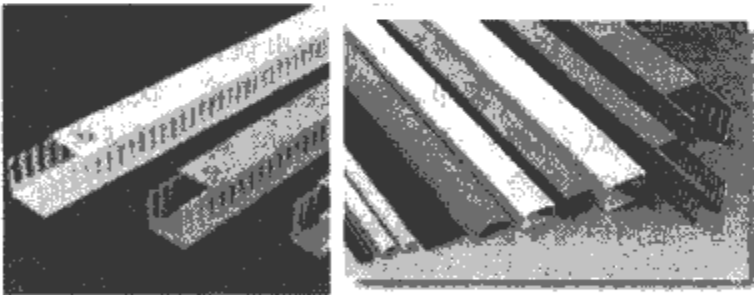


图 3.16-27 行线槽 图 3.16-28 PZC 装潢型

表 3.16-11 行线槽尺寸

行线槽宽度 B	行线槽高度 H					mm
	20	25	35	50	80	
15	✓					
20		✓	✓			
25		✓	✓	✓	✓	
35		✓	✓	✓	✓	
50			✓	✓	✓	
80				✓	✓	
100				✓	✓	
140				✓	✓	

5.1.1 行线槽的选择

- (1) 行线槽的外观尺寸必须符合 JB/ T9660 的规定。
- (2) 行线槽布线时，导线不应超过行线槽容积的 2/3，

以确保散热。

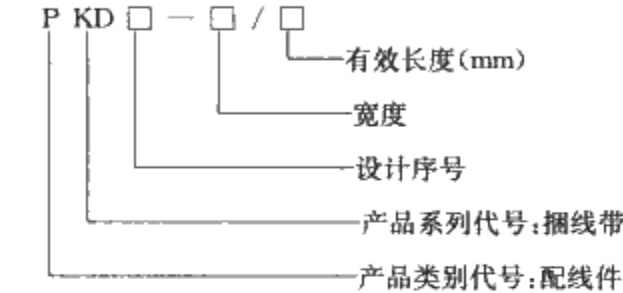
(3) 根据所用导线截面积总和及安装空间的大小按表 3.16-11 选择行线槽的宽度和高度。

5.1.2 应用中简单的检查和技术要求

行线槽使用前取一段用明火燃烧，明火离开后，检查行线槽上的火焰是否在 30s 内熄灭，如能自熄，说明行线槽符合标准要求。

5.2 捆线带

用来捆紧导线束的带形塑料制品。捆线带的品种有自锁式捆线带、可解式捆线带、固定式捆线带、标志捆线带等。其型号编制如下。



国内常用的捆线带是自锁式和可解式两种，自锁式带有不可解的锁定机构，相反可解式带有自锁可卸式机构，如图 3.16-29 所示。捆线带规格尺寸见表 3.16-12 和表 3.16-13。

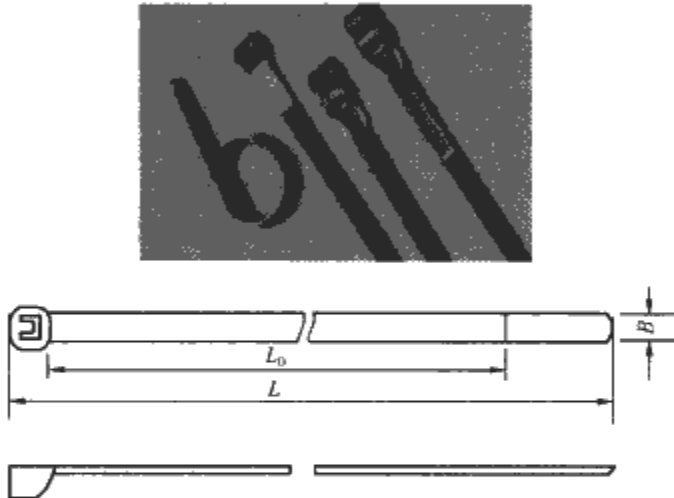


图 3.16-29 自锁式捆线带

表 3.16-12 自锁式捆线带 mm					
型号	主要参数				可捆扎导线束的最大直径
	L	L ₀	B	δ	
PKD1—2.5/40	60	40	2.5	1	12
PKD1—3/80	106	80	3	2	25
PKD1—4/150	183	150	4	1.4	45
PKD1—7/210	250	210	7	1.8	65

表 3.16-13 可解式捆线带 mm					
型号	主要参数				可捆扎导线束的最大直径
	L	L ₀	B	δ	
PKD2—3/80	100	80	3	1	25
PKD2—4/120	150	120	4	2	38
PKD2—4/160	200	160	4	1.5	50
PKD2—8/100	140	100	8	1.5	32
PKD2—8/140	180	140	8	1.5	44
PKD2—8/200	240	200	8	1.6	64
PKD2—10/310	350	310	10	1.7	98
PKD2—12/410	450	410	12	1.8	130

5.2.1 捆线带的选择

- (1) 按电气设备中布线系统导线截面积的总和选择捆线带。
- (2) 定性产品线路变化不大的电气设备中宜选用自锁式捆线带。试验中的产品或线路需要修改的电气设备中宜选用可解式捆线带。

5.2.2 应用中简单的检查和技术要求

- (1) 捆线带使用前用明火燃烧，明火离开后，检查捆线带上的火焰是否在 30s 内熄灭，如能自熄，说明捆线带符合标准要求。
- (2) 将捆线带的一端固定在一个不可移动的夹接处，用手使劲拉，如果不断，便可以安全的使用。

5.3 缠绕管

为实现柔软保护而对导线束实行缠绕式捆扎的螺旋式管状制品，如图 3.16-30 所示。其型号编制如下。

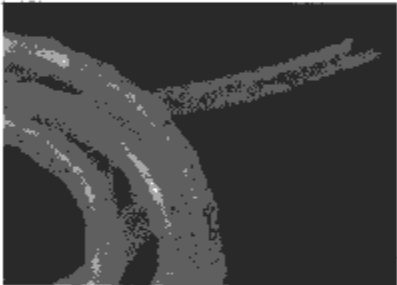
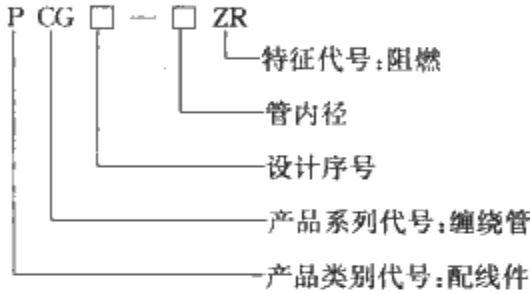


图 3.16-30 缠绕管

缠绕管的规格尺寸见表 3.16-14。

表 3.16-14 缠绕管的规格尺寸 mm					
型 号	外形尺寸			缠绕导线束外径 D 推荐尺寸 (mm)	备注
	A	B	L		
PCG1—4	φ4	φ9.5	≥2500	φ4≤D≤φ12	普通型
PCG1—8	φ8	φ10.5		φ8≤D≤φ16	
PCG1—12	φ12	φ14.5		φ12≤D≤φ20	
PCG1—16	φ16	φ20		φ16≤D≤φ24	
PCG1—20	φ20	φ24		φ20≤D≤φ28	
PCG1—4 ZR	φ4	φ9.5	≥2500	φ4≤D≤φ12	阻燃型
PCG1—8 ZR	φ8	φ10.5		φ8≤D≤φ16	
PCG1—12 ZR	φ12	φ14.5		φ12≤D≤φ20	
PCG1—16 ZR	φ16	φ20		φ16≤D≤φ24	
PCG1—20 ZR	φ20	φ24		φ20≤D≤φ28	

5.3.1 缠绕管的选择

- (1) 电气设备中应选用阻燃型缠绕管。
- (2) 缠绕管一般用在较少的线束或活动部位的线束。

5.3.2 应用中简单的检查和技术要求

缠绕管使用前取一段用明火燃烧，明火离开后，检查缠绕管上的火焰是否在 30s 内熄灭，如能自熄，说明缠绕管符合标准要求。

5.4 齿形保护带

包覆在金属板的洞孔边缘，防止导线穿过洞孔时绝缘层被割伤的槽形两侧带齿的制品，如图 3.17-31 所示。其型号

编制如下。

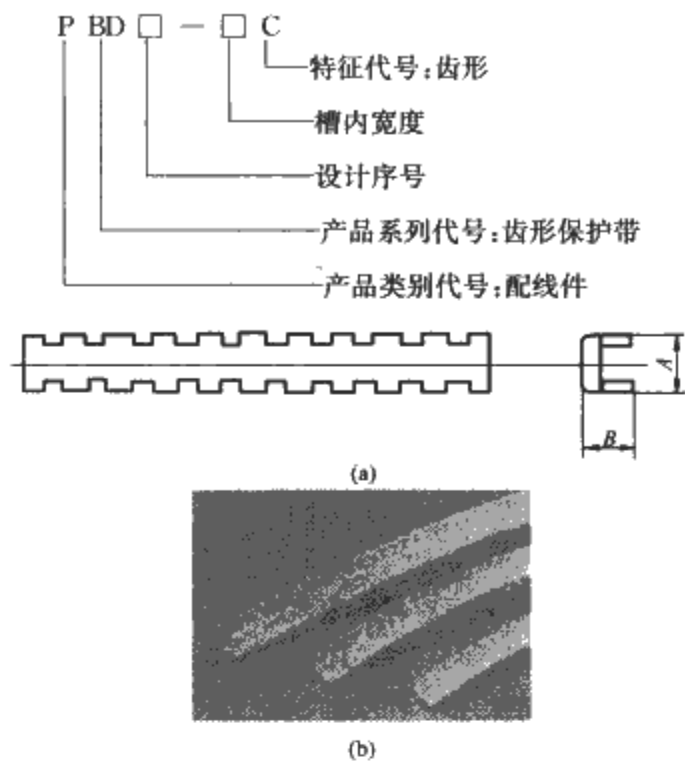


图 3.16-31 齿形保护带
(a) 齿形保护带断面图; (b) 齿形保护带

齿形保护带的规格尺寸见表 3.16-15。

表 3.16-15 齿形保护带的规格尺寸 mm			
尺 寸	PBD1—10 型	PBD1—20 型	PBD1—30 型
A	3.5	4.5	5.5
B	3.5	3.5	4.2

5.4.1 齿形保护带的选择

电气设备中应选用阻燃齿形保护带。

5.4.2 应用中简单的检查和技术要求

- (1) 齿形保护带使用前取一段用明火燃烧，明火离开后，检查齿形保护带上的火焰是否在 30s 内熄灭，如能自熄，说明齿形保护带符合标准要求。
- (2) 取一段齿形保护带用手反复折弯 10 次，放开后自动恢复原状，可认为合格。

5.5 符号标记

为了操作、维修方便，以文字、数字、字母等作指示的平面标牌。它包括符号牌、符号框、标记牌及色标（用颜色来区分相序、接地、极性等的标记）。其型号编制如下。

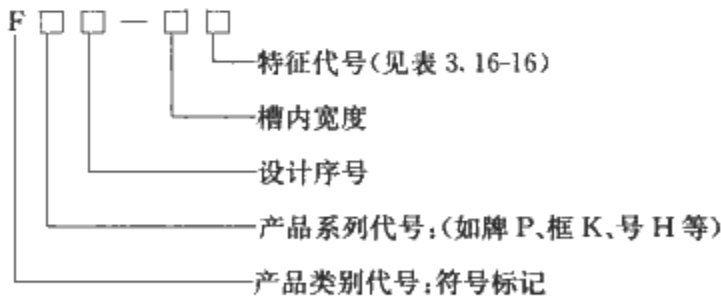


表 3.16-16 特征代号		
管状形	带状形	开口形
G	D	K

国内符号标记的品种较多，符号标记的文字内容可根据用户的需要而定。

6 母线无孔连接技术

低压成套开关设备和控制设备是由若干种，若干数量的低压电器，通过它们之间的电气连接，方能形成某一传输电

能、分配电能、安全保护、能可靠工作的功能性设备。此时就要求连接是绝对可靠无误，还要做到加工（称电气装配工序）时，操作简单、省时、省料、省工。以往在成套设备的电连时，采用母排类（早期是钢制、逐步过渡到有色金属——铜制、铝制。）、电缆类、电磁线类等不同类别的导体，截面、形状各异。如母排有硬母排、异型断面型材母排及叠层母排、薄带母排，使用中还可能出现单根或多根。而电缆类，又分为带护套、不带护套，有电力用、控制用、计算机用，单芯、双芯、三芯、四芯等多规格，其导体截面有 0.5~300mm²。显然要实现低压电器元件之间通过灵活运用各类导体连接（要考虑环境条件及接触点压降、温升等因素）和它们之间的灵活换接，必须从设计到施工和检验与质量保障各环节，需要非常重视的问题。本节将介绍满足上述各种连接目的和要求的一种新方法——母线无孔连接技术，它包括扁平板式无孔连接技术，勾头螺钉——导电块式母线端子，导电夹连接技术和母线适配技术。

6.1 扁平板式无孔连接

扁平板式无孔连接的导电机理是：依靠上、下两块扁平板，将需要连接的矩形母排与母排（包括叠层母排）或垫块夹在中间，并通过在扁平板外沿（四边）螺孔，穿以螺钉，加力压紧，实现导电。它可实现硬排 10×5mm²，12×5mm²，20×5mm²，20×10mm²，20×15mm²，叠层排 3（9×0.8）mm²，6（9×0.8）mm²，4（16×0.8）mm²，6（16×0.8）mm² 的电流 100~250A（400A）的搭接、换接导体。扁平板根据被接母排截面形状、尺寸进行选择。供选用的扁平板，可做成方形、矩形、菱形，分上、下两片，上片打的孔直径比紧固螺钉稍大，下片为带螺纹孔与紧固螺钉尺寸相同，作为紧固时的螺母用。

6.2 框型导电夹母线端子

框型导电夹（半拱式母线端子）是由半拱框（端子上部），导电块和下导电件组成。导电框为半拱形，用冷轧钢板连冲、弯制成。上导电块为钢质，用铜粉压铸成型，正面为棱板状（适用电缆连接），反面为平面（适用于母排连接），具体放置、由被连接的导体决定。下导电件起着支撑作用（提供压紧的反力），也是用冷轧钢板冲、弯成型。

6.3 勾头螺钉——导电块式母线端子

端子的组成如下：

- (1) 勾头螺钉——导电块式母线端子由起紧固、固定作用的勾头螺钉和起压紧作用的导电块及为防止滑扣（大于 400A 时、要用双螺母）的螺母组成。导电块的材料为紫铜板，其截面（厚度×长边）至少等于被连接导体最大截面。勾头螺钉为铸钢件式锻压件（锻造模压成型），表面要镀锌钝化。勾头螺钉要受到拉紧力，所以它的头部要保证一定的拉力矩，一般为 10N、20N、30N 或 40N，具体数值由导体截面及其厚度和工作电流决定。例如适用于 1000A 的母线，要求 40N 的夹紧力，630A 的为 30N，400A 为 20N，250A 为 10N。
- (2) 规格、尺寸的选择见表 3.16-17。

表 3.16-17 勾头螺钉—导电母线端子选用表			
勾头螺钉规格 (mm)	适用母线 (mm ²)	型 号	应用的母线系统
2×30×10	2×50×2	K30×10L	L1, L2, L3
1×30×10	50×12	K3×10PEN	PEN, N, PE

续表

勾头螺钉规格 (mm)	适用母线 (mm ²)	型 号	应用的母线系统
3×40×10	2×50×12	K440×10	L1, L2, L3
2×30×10 2×40×10	3×9×08 11×21×1	AW3040L-K20	
1×30×10	3×9×08 11×21×1	AW30PEN-K20	
2×30×10 30×10 3×40×10		AVS30L AVS30 PEN AVS40	L1, L2, L3 L1, L2, L3

6.4 导电夹连接技术

钩型导电夹是一种导电部分如同一钩夹形状的导电件，将它直接插入被连接母排，其弹簧片起压紧作用。另一导体（可以是电缆也可是叠层母排）从侧上部插入，并用顶部的螺钉紧固，完成装配工作。

6.5 母线适配技术

母线适配技术指的是在常规母线的基础上，通过改变母线的结构和形状或/和设立辅助件，达到使母线更适应于电器元件的装配与连线，获得连接的可靠性与装配的快捷化，省时、省力、节材。母线适配技术有适用于微型断路器的梳形汇流排和适用于塑壳断路器、刀开关（刀熔开关）等的母线适配技术。

6.5.1 梳形汇流排适用技术

模数化梳形汇流排，因为它的外形像梳子而得名，它由梳状铜排及绝缘护套组成，梳状铜排选用优质紫铜板制作，护套选用绝缘性能好的优良阻燃塑料，其整体结构严密，尺寸精确，坚固耐用，电气间隙、爬电距离达到标准要求，符合配电板的额定绝缘电压 500V、630V、690V 等级要求。截面积、绝缘性能、耐压等级等技术指标均经国家有关部门检测，如图 3.16-32 所示。每根汇流排上排列着许多个模数，外形尺寸相同的接头片。这些汇流排根据额定电流的不同，模数的不同，连接方式的不同，又分为多种规格品种。

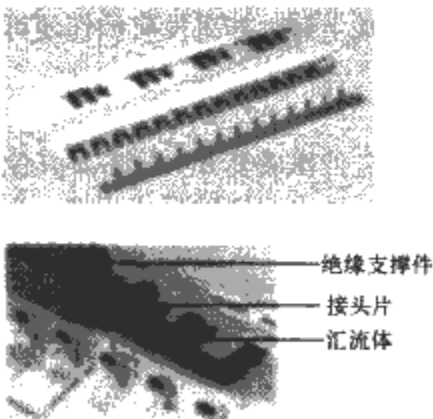


图 3.16-32 汇流排（梳形汇流排）

6.5.1.1 汇流排的分类

- (1) 根据额定电流的大小，可分为 32A，41A，63A。
- (2) 根据模数的不同可分为 1P（中心距 18mm），2P（中心距 36mm），3P（中心距 54mm），4P（中心距 72mm）。
- (3) 根据进线方式的不同，汇流排的形状可分为矩形和 U 形，矩形用于进线方式采用压线框式（如多数小型断路器的进线方式），U 形用于插入连接螺钉式（如西门子 5SX11 系列）。

6.5.1.2 汇流排的规格品种

国内已有的汇流排规格品种见表 3.16-18。

表 3.16-18 汇流排规格

规格型号	中心距 (mm)	接头片尺寸 (mm)		汇流体尺寸 (mm)	
		厚	宽	厚	宽
JP□32A/1P	18	1	4	1	10
JP□32A/2P	36	1	4	1	10
JP□32A/3P	54	1	4	1	10
JP□32A/4P	72	1	4	1	10
JP□32A/1P	18	1.5	4	1.5	7
JP□41A/1P	18	1.5	3.8	1.8	7
JP□41A/2P	36	1.5	3.8	1.8	7
JP□41A/2P	36	1.5	3.8	1.5	7
JP□41A/3P	54	1.8	3.8	1.8	7
JP□63A/1P	18	1.8	6	1.8	8
JP□63A/2P	36	1.8	6	1.8	8
JP□63A/3P	54	1.8	6	1.8	8
JP□63B/1P	17.5	1.8	12~6	1.8	8
JP□63B/2P	35	1.8	12~6	1.8	8
JP□63B/3P	52.5	1.8	12~6	1.8	8
JP□80B/3P	53.1	1.5	11.5~5.5	1.5	10.8

6.5.1.3 汇流排的选择

例如主开关为 C65N/2P/63A，分开关为 2 个 DPNvigi 模数是 9×4=36，6 个 C65N 模数是 9×2=18，这是一种很不规则的接线图，一般汇流排满足不了它的需要，这时可以选择移动式汇流排（见图 3.16-33）。

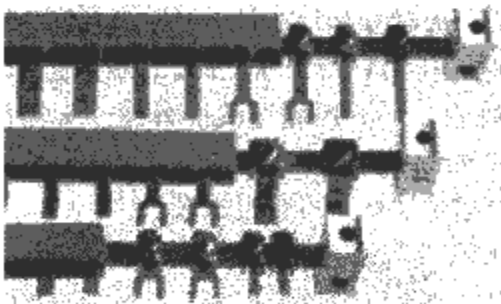


图 3.16-33 移动式汇流排

同理 32A、41A 汇流排也是这样选择。

6.5.1.4 应用中简单的检查和技术要求

- (1) 汇流排的额定电流不低于主开关的电流。如 63A/3P，中心距 54mm，分开关 1P×9，要将主开关 A、B、C 三相均匀分配，每相有三个接头片，即为 63A/3P×3。
- (2) 绝缘支撑件应采用阻燃工程塑料，且能承受灼热丝顶端 960℃或 850℃的着火危险试验。

6.5.2 母线适配技术

母线适配技术是指自 20 世纪 70 年代末期发展起来的母线安装系统。它实质上是将低压电器设计成直接安装在母线上（不需要安装板），既完成固定，又可兼得导体连接（如刀开关、刀熔开关、微型断路器、电表、指示灯等）。如果

某些低压电器不能设计成适用母线安装结构（如塑壳断路器），则设计出一种通用母线安装转换器，替代完成适用母线安装结构。有人将其称之母线系统，也有人将其称之母线适配技术。显然这样做，将缩小了元件的安装体积（现代紧凑型开关设备，由追求小的安装面积，变为希望缩小安装体积），缩短了装配时间，提高了效率。

对于不是特殊设计的其他元件如何安装在母线上呢？先将母线适配器装在母线上，再将元件安装在适配器上。这样无论是何种类型元件都可通过适配器完成适配系统的施工安装。

7 大电流电缆连接技术

低压配电设备产品以及在防火建筑电器施工中急需实现低压大电流电缆直接连接（包括电缆不切断连接）和 T 接、Y 接线。与这种连接配套的接线端子称之为“大电流电缆直接 T 接、Y 接端子”。

大电流电缆直接 T 接、Y 接端子主要技术形式有：

（1）直压式螺纹型。大电流（也称大截面）直压式螺纹型接线端子排，由绝缘底座、接线框和防护罩三部分组成。接线框由导电片、线夹、螺钉、螺母和支撑框等多种零部件构成。线夹与导线接触面成包容形的犬牙交错结构，具有接触面大、压接可靠的特点。通过不同形状的限位相互组合，可形成双层接线，每个接线端子分别可接入最多 4 根导线，每个零部件间均通过装配组合。因此可在下层接入主干线，上层接入分支线，形成干线不断的“T 型”连接，同时可接入软、硬铜排或其他导体。接线框的特殊结构还可以使其在使用中随着扭力矩的增大，使支撑框产生微小变形，加大压紧力，保证可靠连接、防止松动。这种技术的优点是接线截面大，容量大，可达 1000A、1000V，同时在对导线夹和导电片作些选择性配合后。很容易按 GB 50217《电力工程电缆设计规范》的要求实现电缆的分线。并可做到电缆不切断下完成建筑配电系统 GB 50058《爆炸和火灾危险环境电力装置设计规范》的要求，免除了中间电缆接头，还可实现可靠的“铜—铝过渡”要求。因此特别适用 GB 7251 要求的在柜内外实现电缆进出线的明显断点。

（2）直压式环型。直压式环型包括可拆、合的两个半环型线夹座和可径向移动的夹紧件，分相绝缘件，绝缘支架等部分。规格最高 1000V， $4 \times 240\text{mm}^2$ ，分 3 线制、4 线制、5 线制、3+1 线制。可不用剥导线的外皮，无需配电排的安装件，安装方便、结构紧凑，还可水下施工，若配专用的密封外壳，还可水中运行，可带电安装。

（3）直压式筒式。直压式筒式对于 T 接、Y 接技术，主要是筒型本体，（镀锡铝镁硅合金）和压接螺丝，（镀锡黄铜）。它是用于不同形状导线（三芯、多芯、单芯、圆形多股等）结构紧凑，无需专用工具，可实现铜铝过渡，特别适用于防火、爆炸危险环境下的电力设备安装。

（4）直压式鞍型。直压式鞍型的主要部分为鞍型导电支架，齿状导电件，填充绝缘件（弹性塑胶）等组成。它适用于不用剥导线外皮，可带电安装，特适用于电力安装。

8 成套开关设备专用辅件

成套开关设备专用辅件为成套设备安装和连接设计的专用产品的总称。一般包括连接件（在 GCS 抽出式开关柜中用于引出线）、专用工具、结构辅件、门锁、铰链、通风窗（低压配电柜中通风、排气材料采用阻燃 ABS）、限位装置等。

8.1 母线支撑件

8.1.1 母线架（母线框）

母线架也称母线框，主要用于低压成套开关设备和控制设备及其他电气设备中安装固定母线（见图 3.16-34）。国内已有的母线架形式很多（见图 3.16-35），一般都是为不同的成套开关设备专门设计的。其型号编制如下。

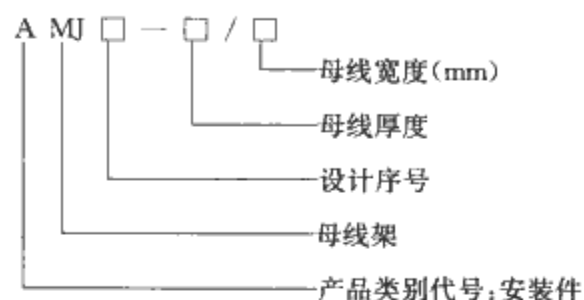


图 3.16-34 开关柜用母线框



图 3.16-35 固定面板式
开关柜用母线框

8.1.2 母线架的选择

- （1）按母排的宽度和厚度选择母线架。
- （2）母线架的额定电压不低于装置的额定电压。
- （3）母线架的额定电流不低于所在回路的电流。
- （4）应用中简单的检查和技术要求。

1) 母线架在第一次使用前取一个用明火燃烧，明火离开后，检查母线架上的火焰是否在 30s 内熄灭，如能自熄，说明母线架符合标准要求。

2) 如果母线架是采用聚碳酸酯合金材料制造的，在第一次使用前用力往地上摔，如果没有损伤便可以安全使用。

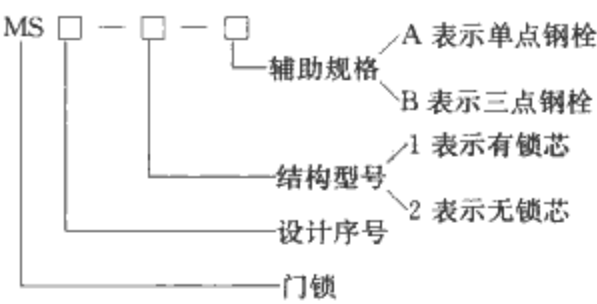
8.2 门锁

门锁是用于高、低压成套开关设备及其他电气设备作栓锁柜门的专用产品。国内门锁的形式很多，图 3.16-36 所示为其中一部分。



图 3.16-36 门锁形式

（1）型号编制如下。



(2) 门锁的规格尺寸以产品使用说明书为准。

(3) 门锁的选择：

- 1) 如果成套开关设备是开关柜，需选用尺寸较大一些的门锁，既耐用又美观。
- 2) 如果成套开关设备是箱类，可根据箱的尺寸选用中型或小型门锁比较适合。

第17章 低压成套开关设备和控制设备的设计

1 概述

工厂需建立、保持文件化的技术文件,以确保产品质量的相关过程有效运作和控制。低压成套开关设备和控制设备90%为非标准产品,产品设计尤为重要,不仅在样机试制时需要设计,在正式生产时也需要根据用户的要求进行设计,以指导生产的正常进行。

1.1 产品技术标准

产品设计标准或规范是产品质量保证的一个重要内容,其要求应不低于该产品的国家标准要求。标准的版本会有所变化,应关注标准版本变化的最新版本,采用有效的最新版本。

1.1.1 低压成套开关设备的主要技术标准

GB 7251.1—2005/IEC 60439—1:1999《低压成套开关设备和控制设备 第一部分:型式试验和部分型式试验成套设备》

GB 7251.2—2006/IEC 60439—2:2000《低压成套开关设备和控制设备 第二部分:对母线干线系统(母线槽)的特殊要求》

JB/T 9662—1999《密集绝缘母线干线系统(密集绝缘母线槽)》

JB/T 8511—1996《空气绝缘母线干线系统(空气绝缘母线槽)》

GB 7251.3—2006/IEC 60439—3:2001《低压成套开关设备和控制设备 第三部分:对非专业人员可进入场地的低压成套开关设备和控制设备—配电板的特殊要求》

GB 7251.4—2006/IEC 60439—4:1990《低压成套开关设备和控制设备 第四部分:对建筑工地用成套设备(ACS)的特殊要求》

GB 7251.5—2008/IEC 60439—5《低压成套开关设备和控制设备 第五部分:对公用电网—动力配电网成套设备的特殊要求》

GB/T 7251.8—2005《低压成套开关设备和控制设备智能型成套设备通用技术要求》

JB/T 9661—1999《低压抽出式成套开关设备》

GB/T 15576—2008《低压成套无功功率补偿装置》

JB/T 9663—1999《低压无功功率自动补偿控制器》

JB/T 10216—2000《电控配电用电缆桥架》

JB/T 8456—2005《低压直流成套开关设备》

GB/T 17467—1998《高压/低压预装式变电站》

GB/T 20641—2006/IEC 62208《低压成套开关设备和控制设备空壳体的一般要求》

1.1.2 相关的主要技术标准

GB 4208《外壳防护等级》

GB 7947《导线的颜色或数字标识》

GB/T 4025《指示灯和按钮的颜色》

GBJ 149《电气装置安装工程母线装置施工及验收规范》

JB/T 3085《电气传动控制装置的产品包装与运输规程》

1.2 产品图样及设计文件标准

1.2.1 主要通用标准

GB 4457、GB 4458、GB 4459《机械制图》

GB 4728《电气图用电气图形符号》

GB 6988《电气制图》

GB 7159《电气技术中的文字符号制定通则》

GB 5094《电气技术中的项目代号》

GB 4026《电器接线端子的识别和用字母数字标志接线端子的通则》

1.2.2 产品图样及设计文件专用标准

JB/T 3752.1《低压成套开关设备和控制设备产品型号编制方法》

JB/T 6753.1~5《电工设备的设备构体公差 钣金件和结构件的一般公差及其选用规则》

JB 5875—91《低压成套设备接线图和接线表绘制方法》

JB/T 5054.1~10《产品图样及设计文件》

JB/T 9167.1~5《工艺装备设计管理导则》

JB/T 9169.1~14《工艺管理导则》

1.3 主要技术参数

1.3.1 额定电压

1.3.1.1 额定工作电压(成套设备一条电路的)

成套设备中某一条电路的额定工作电压(U_e)是指和该电路中的额定电流共同决定设备使用的电压值。对于多相电路,系指相间电压。成套设备的制造商应对保证主电路和辅助电路正常运行的电压极限值作出规定。在任何情况下,这些电压极限值必须保证在正常负载条件下,电气元件控制电路端的电压保持在相关的国家标准中规定的极限值内。

通常优选值(V):主电路为220(230),380(400),660(690),750,1140(1200);辅助电路为6,12,24,36,42,48,110,220,380。

1.3.1.2 额定绝缘电压(成套设备中一条电路的)

介电试验电压和爬电距离都参照成套设备中一条电路的额定绝缘电压(U_i)值确定。

成套设备任何一条电路的最大额定工作电压不允许超过其额定绝缘电压。成套设备任一电路的工作电压,即使是暂时的,也不得超过其额定绝缘电压的110%。

通常优选值为(V):250,500,660,800,1000,1200。

1.3.1.3 额定冲击耐受电压(成套设备中一条电路的)

成套设备中一条电路的额定冲击耐受电压(U_{imp})应等于或高于成套设备所在系统中出现的瞬态过电压规定值。

在规定试验条件下,成套设备的电路能够承受的规定波形和极性的脉冲电压峰值,而且电气间隙值参照此电压值确定。

1.3.2 额定电流(成套设备中一条电路的)

成套设备中的某一电路的额定电流(I_n)由制造商根据其内装电气设备的额定值及其布置和应用情况来确定。由于

确定额定电流的因素很复杂，因此不可能给出标准值。通常优选值（A）：母线的额定电流为 100，200，400，500，630，800，1000，1250，1600，2000，2500，3150，4000，5000，6300，7400。

1.3.3 额定短时耐受电流（成套设备中一条电路的）

成套设备中一条电路的额定短时耐受电流（ I_{cw} ）是指由制造商给出的，该电路在 GB 7251.1 第 8.2.3 规定的试验条件下能安全承载的短时耐受电流方均根值。除非制造商另外规定，该时间为 1s。

通常优选值：额定短时（1s）耐受电流（kA，有效值）为 6，10，15，20，30，50，65，80，100，120，150。


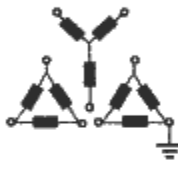

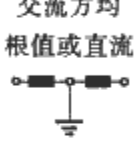
1.3.4 额定峰值耐受电流（成套设备中一条电路的）

成套设备中一条电路的额定峰值耐受电流（ I_{pk} ）是指在规定的试验条件下，制造商规定此电路能够圆满地承受的峰值电流。

1.3.5 设备的过电压类别及额定耐冲击电压值

电源系统标称电压与相应的设备额定冲击耐受电压之间关系的实例见表 3.17-1。表 3.17-1 给出的额定冲击耐受电压值是依据浪涌抑制器的性能特征确定的。它们的基本特性符合 IEC 60099—1《避雷器 第 1 部分：用于交流系统的阀式避雷器》。还应指出，用电源系统的条件，例如合适的阻抗或电缆馈线，可以控制与表 3.17-1 的值相关的过电压值。

表 3.17-1 电源系统标称电压与相应的设备额定冲击耐受电压之间关系的实例

额定工作电压 对地最大值交 流方均根值或 直流（V）	电源系统的标称电压（≤设备的额定绝缘电压） （V）				额定冲击耐受电压（1.2/50μs）优先值 （kV） （在海拔 2000m 时）			
	<div>交流方均根值</div> 	<div>交流方均根值</div> 	<div>交流方均根值或直流</div> 	<div>交流方均根值或直流</div> 	过电压类别			
					IV	Ⅲ	Ⅱ	I
					电源进线点 （进线端） 水平	配电电路 水平	负载（装置 设备）水平	特殊保护 水平
50	—	—	12.5，24，25 30，42，48	—	1.5	0.8	0.5	0.33
100	66/115	66	60	—	2.5	1.5	0.8	0.5
150	120/208 127/220	115，120 127	110，120	220~110， 240~120	4	2.5	1.5	0.8
300	220/380，230/400 240/415，260/440 277/480	220，230 240，260 277	220	440~220	6	4	2.5	1.5
600	347/600，380/660 400/690，415/720 480/830	347，380，400 415，440，480 500，577，600	480	960~480	8	6	4	2.5
1000	—	660 690，720 830，1000	1000	—	12	8	6	4

1.3.6 污染等级和绝缘材料组别

1.3.6.1 污染等级

GB/T 16936.1—1997《低压系统内设备的绝缘配合 第一部分原理、要求和试验》标准规定了污染等级和材料组别的划分。

污染等级（指微观环境中的污染等级）根据导电的或吸湿的尘埃，游离气体或盐类和由于吸湿或凝露导致表面介电强度或电阻率下降事件发生的频度而对环境条件作出的分级。设备或元件的绝缘材料所处的污染等级是与设备或元件所处的宏观环境的污染等级不同，因为由外壳或内部加热提供了防止吸湿和凝露的保护。对装在外壳内的开关器件或元件，可使用外壳内环境条件的污染等级。

为了确定电气间隙和爬电距离，确立了以下四个微观环境的污染等级：

（1）污染等级 1。无污染或仅有干燥的，非导电性的污染，该污染没有任何影响。

（2）污染等级 2。一般仅有非导电性的污染，但应预期到偶然由于凝露会发生暂时的导电性。

（3）污染等级 3。存在导电性污染或由于凝露使干燥的非导电性污染变为导电性的污染。

（4）污染等级 4。造成持久的导电性，例如由于导电尘埃或雨雪所引起的。

如果没有其他规定，工业用途的成套设备一般在污染等级 3 环境中使用。而其他污染等级可以根据特殊用途或微观环境考虑采用。

1.3.6.2 绝缘材料组别

相比漏电起痕指数（CTI）：材料表面能经受住 50 滴电解液而没有形成漏电痕迹的最高电压值。漏电起痕指固体绝缘材料表面在电场和电解液的联合作用下逐渐形成导电通路的过程。GB/T 16936.1 将绝缘材料按其 CTI 值划分为四组：

绝缘材料组别 I：600V≤CTI

绝缘材料组别Ⅱ：400V≤CTI<600V
绝缘材料组别Ⅲa：175V≤CTI<400V
绝缘材料组别Ⅲb：100V≤CTI<175V

低压成套开关设备和控制设备产品的绝缘材料组别一般为Ⅲa。

1.3.7 防触电保护类别

GB/T 12501—1990《电工电子设备防触电保护分类》规定了设备防触电保护类别的主要特征及安全措施，见表 3.17-2。

表 3.17-2 设备防触电保护类别的主要特征

防触电保护类别	0 类	I 类	Ⅱ 类	Ⅲ 类
设备主要特征	没有保护接地	有保护接地	有附加绝缘不需要保护接地	设计成由安全特低电压供电
安全措施	使用环境与地绝缘	能触及的可导电部分与固定布线中的保护接地线连接	双重绝缘或加强绝缘	

低压成套开关设备防触电保护类别通常为Ⅰ类或Ⅱ类，例如汉森公司的 MI 系列塑壳全绝缘箱组式配电柜为Ⅱ类。

1.3.8 电气间隙和爬电距离

以上参数确定后按非均匀电场条件查 GB 7251.1 确定电气间隙和爬电距离的值。

1.3.9 额定分散系数

成套设备中或其一部分中（例如一个柜架单元或框架单元）有若干主电路，在任一时刻所有主电路预计电流最大总和与成套设备或其选定部分的所有主电路额定电流之和的比值，为额定分散系数，用于温升试验中。在没有实际电流资料的情况下，允许采用表 3.17-3 所列常用数据。

表 3.17-3 额定分散系数值

主电路数	GB7251.1 额定分散系数	GB7251.3 额定分散系数
2 与 3	0.9	0.8
4 与 5	0.8	0.7
6~9（包括 9）	0.7	0.6
10 及以上	0.6	0.5

1.3.10 外壳防护等级

1.3.10.1 封闭式设备的最低防护等级要求（见表 3.17-4）

表 3.17-4 封闭式设备的最低防护等级要求

序号	设备对应标准	防 护 等 级	备 注
1	GB 7251.1	IP2X，室外 IP23	通风孔排泄孔不得降低防护等级要求
2	GB 7251.2	IP2X	
3	GB 7251.3	IP2X，可接近表面 IP2XC	
4	GB 7251.4	IP44，门里操作面 IP21	
5	GB 7251.5	IP34D，临时电缆接好后 IP23C	
6	GB/T 17467	IP23D	

1.3.10.2 常用 IP 代码的含义（GB 4208）

GB 4208—1993（修改采用 IEC 60529：1989）《外壳防护等级（IP 代码）》规定了电气设备的防护等级、标示、要求及试验。

IP 代码第一位特征数字、第二位特征数字含义见表 3.17-5，附加字母所代表的对接近危险部件的防护等级见表 3.17-6。

表 3.17-5 第一位特征数字、第二位特征数字含义

特征数字	对设备防护	对人员防护
第一位	1 防直径≥50mm 异物	
	2 防直径≥12.5mm 异物	手指
	3 防直径≥2.5mm 异物	工具
	4 防直径≥1.0mm 异物	金属线
	5 防尘	进入灰尘量不影响设备运行及安全
	6 尘密	无灰尘进入
第二位	1 防垂直滴水	对设备防护
	2 防 15°滴水	—
	3 防淋水	
	4 防溅水	
	5 防强烈喷水	
	6 防短时间浸水影响	
	7 防持续潜水影响	

表 3.17-6 附加字母所代表的对接近危险部件的防护等级

附加字母	防护等级	
	简要说明	含 义
A	防止手背接近	直径 50mm 球形试具与危险部件保持足够的间隙
B	防止手指接近	直径 12mm，长 80mm 的试指与危险部件保持足够的间隙
C	防止工具接近	直径 2.5mm，长 100mm 的试具与危险部件保持足够的间隙
D	防止金属线接近	直径 1.0mm，长 100mm 的试具与危险部件保持足够的间隙

1.4 产品图样

产品设计图样是低压成套开关设备确保产品质量及相关过程有效运作和控制需要的重要文件。图样应完整、正确、一致、有效。

1.4.1 总装配图或布置图

表述外壳尺寸、元器件、母排的安装方式、位置及安装所需要的零部件的型号规格、数量等的图（见图 3.17-1），名称、型号规格、数量在明细表中说明。绘制方法应符合 GB 4457、GB 4458、GB 4459。

1.4.2 开孔图

表述某个部件上元器件的开孔位置及尺寸的图，示例如图 3.17-2 所示。绘制方法应符合 GB 4457、GB 4458、GB 4459。

1.4.3 系统图

由一组主电路（一次回路）图组成，概略表述系统、分系统、成套设备的基本组成部分的主要特征及其功能关系。

用途：为进一步编制详细的技术文件提供依据，供操作和维修时参考。

绘制方法：应符合 GB 6988、GB 4728、GB 7159 等标准的规定。

例如一个变电室的高、低压一次回路图或变电室内低压侧的一次回路图等。系统图中不仅有一次回路图，一般还包含每台设备的外形尺寸、电器元件的名称、型号规格、数量表，示例如图 3.17-3 所示。

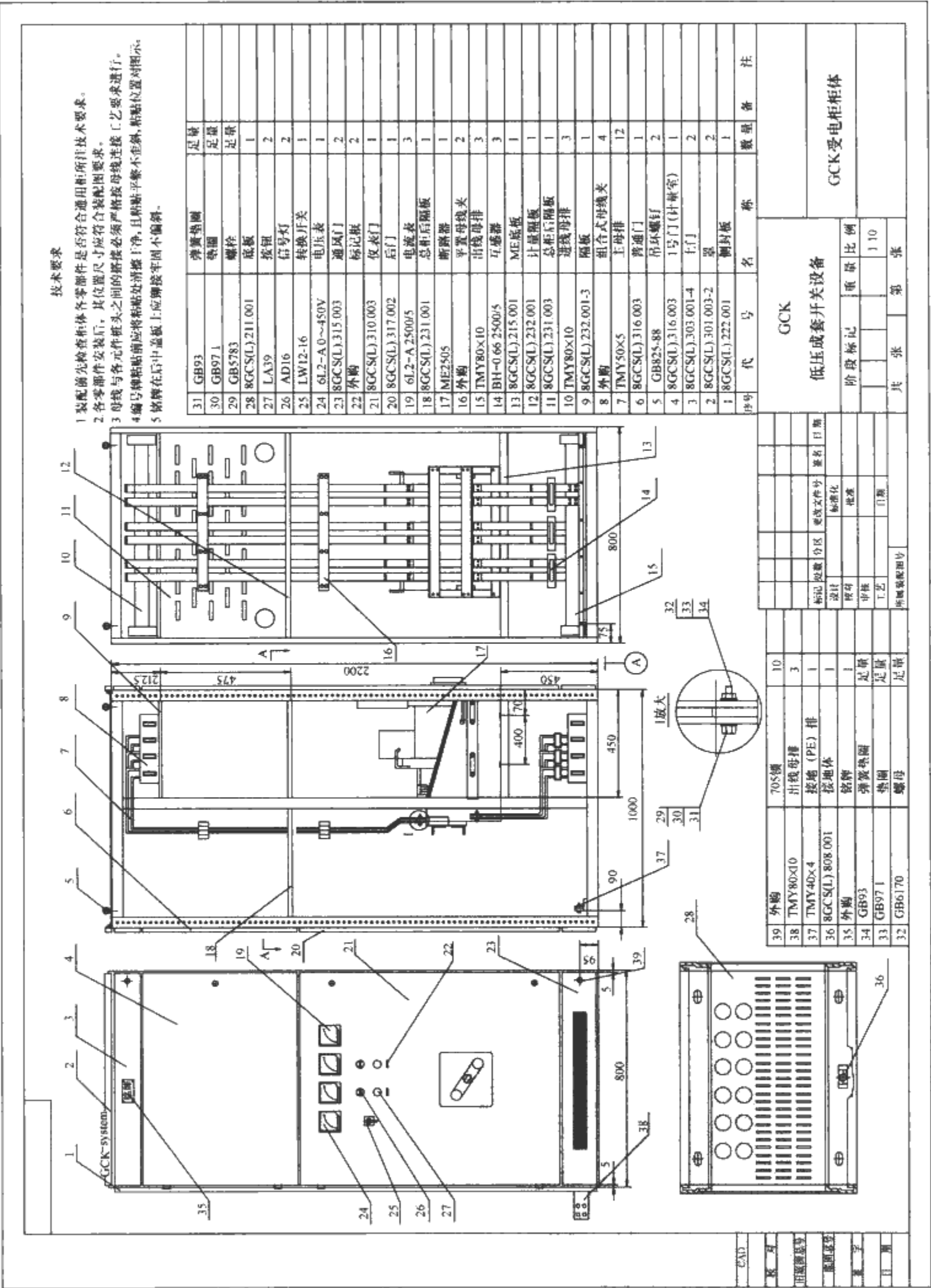


图 3.17-1 总装配图例

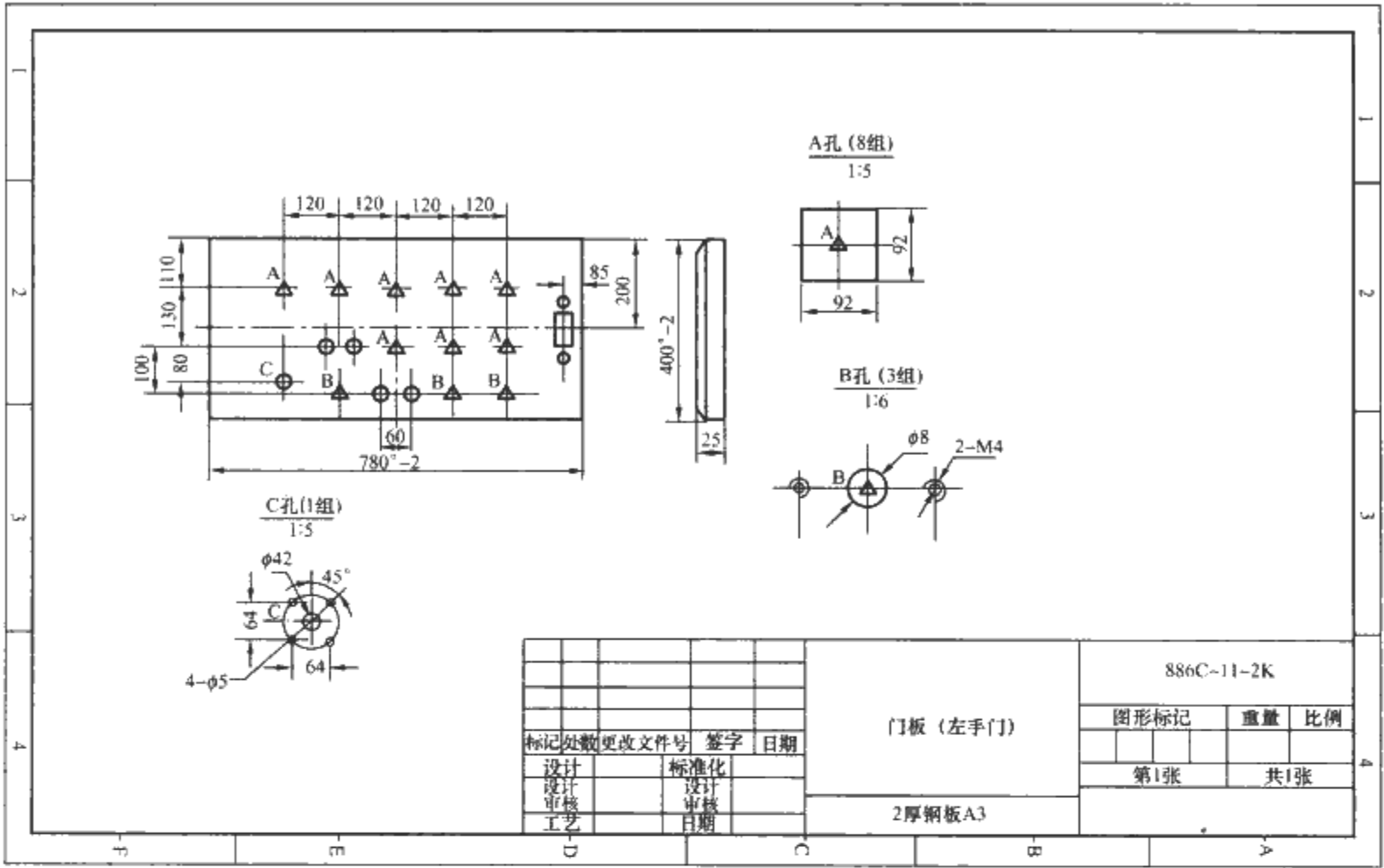


图 3.17-2 开孔图示例

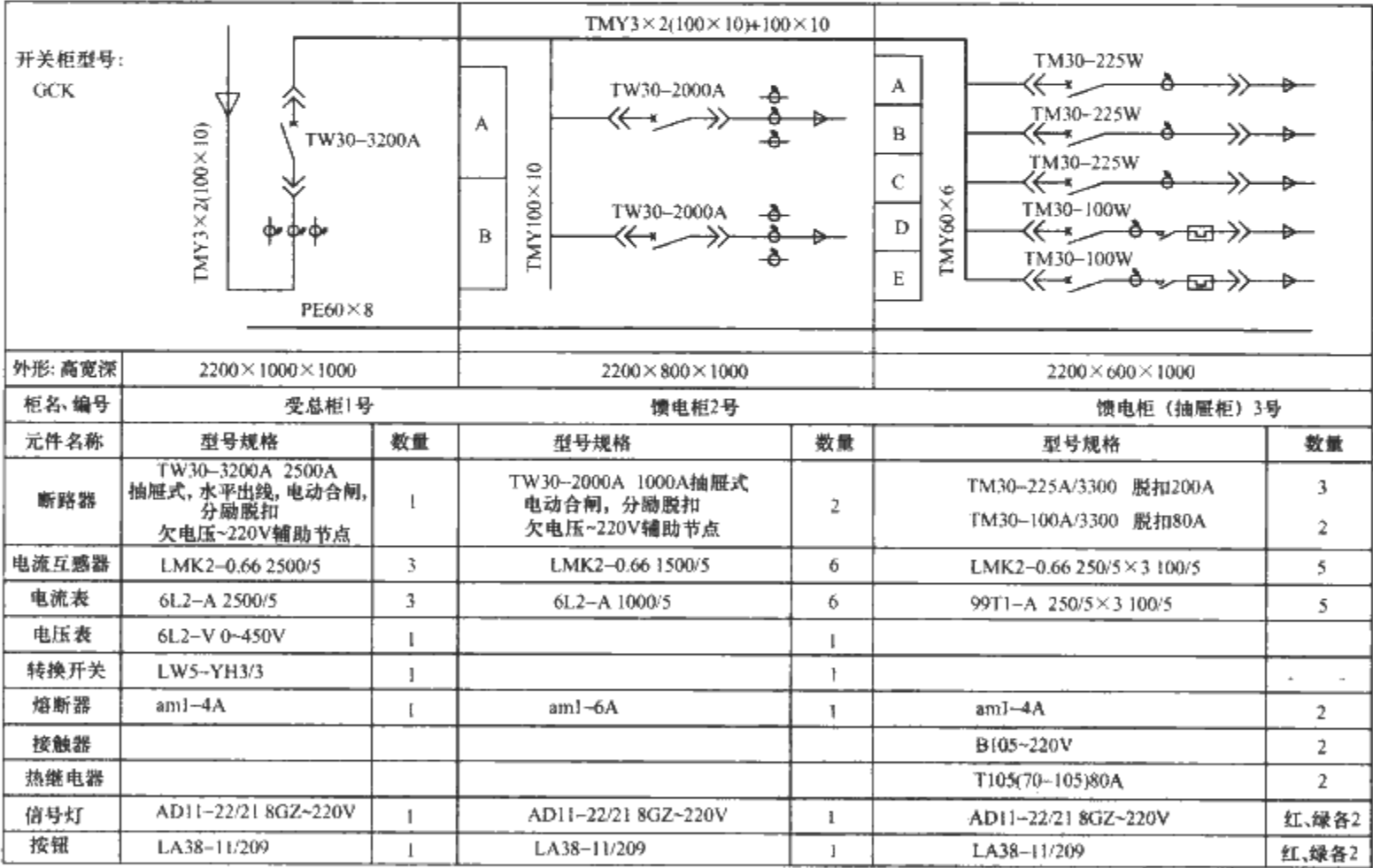


图 3.17-3 系统图示例

1.4.4 电气原理图 (电路图)

由一次 (主电路) 回路图和二次 (辅助电路) 回路图 (控制回路、测量回路) 组成。用于详细表示电路、成套设备的全部基本组成部分和连接关系, 一般指每台设备的电气详图及与其他设备相关连的端子排图, 图中还应包含电器元件的名称、型号规格、数量表。

用途: 详细理解电路、成套设备的及其组成部分的作用原理; 为测试和寻找故障提供信息; 作为编制接线图的

依据。

绘制方法: 应符合 GB 6988、GB 4728、GB 7159 等标准的规定。

1.4.5 接线图或表

依据电路图、布置图每台设备内各电气元件间的相互电气连接关系或每台设备间的相互电气连接关系。应表示出各个项目 (电器元件、端子、组件等) 的相对位置、项目代号、端子号、线号、去线号、导线类型、导线截面积。

用途：安装接线、线路检查、线路维修和故障处理。

绘制方法：应符合 GB 6988、GB 7159、GB 5094、JB 5875 等标准的规定。

成套设备的设计特点是每批产品的图纸都会有所不同，当线路简单时除外，可以用一次回路图代替接线图（例如仅有一次回路的照明配电箱），其他种类图每批产品都应有相适应的图来指导生产，才能保证生产的正常进行。

1.5 产品设计文件

产品在开发决策、设计、试制鉴定、正式生产的各阶段应具备相应的图样及文件，图样及文件类型见表 3.17-7 的示例（用★表示）。企业结合本企业的产品类型、复杂程度、结构特点、批量大小，以及生产规模、生产方式、管理方法等具体情况编制产品设计文件。

表 3.17-7 产品设计图样及文件

序号	图样及设计文件名称	开发决策	新产品设计	样机试制鉴定	正式生产
1	市场调研报告	★			
2	技术调研报告	★			
3	可行性分析报告	★			
4	新产品开发项目建议书	★			
5	技术（设计）任务书		★	★	
6	研究试验大纲		★		
7	研究试验报告		★		
8	计算书		★	★	
9	技术设计说明书		★	★	
10	技术经济分析报告		★	★	
11	产品设计图样		★	★	★
12	合格证（合格证明书）		★		★
13	使用说明书		★		★
14	装箱单		★		★
15	试制鉴定大纲		★		
16	型式试验报告			★	
17	试（用户）运行报告			★	
18	试制总结			★	
19	标准化审查报告		★	★	
20	技术条件（或产品标准）		★	★	★
21	科技查新报告			★评科技进步奖时提供	

1.5.1 市场、技术调研报告

市场调研报告是企业营销、技术等部门通过对产品需求、市场动态、经济效益、技术发展等信息的分析，为企业确定产品结构、新产品开发和市场营销策略制定提供的依据。它包括：

- (1) 对同类型产品市场供求信息的归纳、分析。
- (2) 市场对产品的品种、规格、性能、质量、价格等的要求。
- (3) 预测产品寿命周期。
- (4) 产品经济效果初步分析。
- (5) 新产品开发的必要性。

1.5.2 技术调研报告

技术调研报告是企业技术部门对产品发展趋势、产品质量信息、经济效果等的研究、与分析，提出的设想，应执行

的标准与法规，为新产品开发决策提供依据。

- (1) 国内外产品水平与发展趋势分析。
- (2) 产品功能分析。
- (3) 采用新原理、新结构、新技术、新材料、新工艺的论述。
- (4) 市场和用户要求。
- (5) 新产品的设想包括产品的工作原理、主要结构和性能，以及应执行的标准或法规等。根据需要提出攻关课题及试验大纲。

1.5.3 可行性分析报告

可行性分析报告是企业根据市场预测和技术调研内容，通过对产品性能、寿命周期、企业生产条件、生产能力以及生产成本与预期社会经济、效益分析，为新产品开发决策提供依据。它包括：

- (1) 新产品开发的必要性及市场需求量。
- (2) 占领国内外市场的能力及其产品寿命周期的分析。
- (3) 论述产品总体方案设想的正确性、继承性和实现的可能性。
- (4) 论述产品性能、精度、主要技术参数是否符合适用的产品标准或法规的规定。
- (5) 技术可行性分析。
- (6) 分析并提出产品设计周期和生产周期。
- (7) 企业生产能力和质量保证能力的分析。
- (8) 经济效益分析（产品成本预测和利润预测）。

1.5.4 新产品开发项目建议书

新产品开发项目建议书是根据可行性分析、评审和先行试验的结果提出的新产品合理方案的文件，经企业法人批准后，作为新产品开发的依据。它包括：

- (1) 产品总体方案的概述。
- (2) 新产品开发结论性意见和要求。
- (3) 产品用途及使用范围。
- (4) 基本参数及主要技术性能指标。
- (5) 执行的标准和法规。
- (6) 完成日期和要求。

1.5.5 技术（设计）任务书

技术（设计）任务书是设计对计划任务书提出体现产品合理方案的推荐性意见的文件，经主管部门批准后，作为产品技术设计的依据。它包括：

- (1) 设计依据和执行的标准和法规。
- (2) 产品用途及使用范围、产品主要技术参数、产品主要结构及性能、验收依据。
- (3) 根据需要提出攻关项目和研究试验大纲或对关键技术难题提出解决办法。
- (4) 对新产品开发项目建议书或技术协议书提出有关修改和改进意见、产品基本参数及主要技术性能指标。
- (5) 主要结构概述。
- (6) 产品主要工作原理及系统。
- (7) 国内外同类产品水平、分析比较。
- (8) 标准化综合要求，内容包括：应贯彻的产品标准和其他现行技术标准、新产品预期达到的标准化系数（对模块化设计的产品不要求标准化系数），对材料和元器件标准化要求，与国内外水平的对比，对新产品的标准化要求及预期达到的标准化经济效果等。
- (9) 关键技术解决办法及关键元器件、特殊材料、货源情况分析。
- (10) 对新产品的性能、寿命与成本方面进行分析比较。

(11) 提出装箱技术要求。

(12) 叙述产品既满足用户需求又适应本企业发展要求的情况。

(13) 新产品设计、试验、试制周期的估算。

(14) 产品主要原材料的性能和价格(估算)。

(15) 主要配套件及其价格估算。

(16) 工装模具等费用预算。

(17) 产品试验费用预算等。

(18) 完成日期和要求。

(19) 其他约定事项。

1.5.6 研究试验大纲

研究试验大纲是初步设计和技术设计对某些新的技术、原理、结构、材料以及达到某种性能而提出的研究试验项目、要求等的文件。它包括:

(1) 试验项目名称。

(2) 试验目的和要求。

(3) 试验条件(环境条件、试验装置、测试仪器及工具等)。

(4) 试验方法、步骤和相应记录表格。

(5) 试验注意事项。

(6) 要求试验完成日期。

(7) 经费估计。

(8) 提出单位及人员。

1.5.7 研究试验报告

研究试验报告是按研究试验大纲的要求进行试验验证,从而得出的数据、结论而编制的文件。它包括:

(1) 试验项目及任务来源。

(2) 试验目的和要求。

(3) 试验起止日期。

(4) 试验数据。

(5) 试验过程中所发生的问题及分析处理情况。

(6) 试验结论和建议。

(7) 试验单位及人员。

1.5.8 计算书

计算书是对产品的性能、主要结构、系统、安全、强度等方面的理论计算的文件。它包括:

(1) 计算目的。

(2) 采用的计算方法、公式来源和公式符号说明。

(3) 计算过程和结果。

1.5.9 技术设计说明书

它包括:

(1) 技术设计依据。

(2) 对技术(设计)任务书中确定的参数、主要技术性能指标、结构、原理等进行说明。

1.5.10 技术经济分析报告

技术经济分析报告是运用系统工程、可行性工程和价值工程等方法论证产品及其组成部分在技术经济上合理性的文件。它包括:

(1) 确定对产品性能、质量及成本费用有重大影响的主要零部件。

(2) 同类型产品相应零部件的技术经济分析比较。

(3) 运用价值工程等方法,从成本与功能相互关系,分析产品主要零部件结构、性能、精度、材料等项目,论证达到技术上先进和经济上合理的结构方案。

(4) 预期达到的经济效益。

1.5.11 产品设计图样

产品设计图样是在工作图设计时绘制的,包括产品及其

组成部分在制造、检验时所必须的技术图样。样机试制图样、小批试制图样和正式生产图样均是工作图样。

1.5.12 合格证(质量合格证)

合格证是产品经检验后,证明其合格的文件。它包括:

(1) 国名、厂名(和/或商标)。

(2) 产品型号、名称、出厂编号。

(3) 产品执行的标准。经检验合格,准许出厂等字样。

(4) 必要时附检验单。制造单位对用户有关产品性能、安全和可靠性的各种测试、检验数据的文件。

(5) 检验员、检验负责人签章及日期。

1.5.13 使用说明书

使用说明书是供用户了解产品,正确吊运、安装、调整、使用和维修产品的文件。

1.5.14 装箱单

装箱单是产品实物装箱的清单,供生产企业包装和用户开箱清点实物用。它包括:

(1) 产品(主机、辅机、配套件)名称、规格、数量。

(2) 从产品上拆下包装的零、部件名称、数量。

(3) 随机附件、工具名称、数量。

(4) 随机备件名称、数量。

(5) 成套设备安装所需的材料、名称、数量。

(6) 随机文件名称、数量。

装箱单中应注明:国名、厂名、产品型号、名称、出厂编号、装箱部位、装箱检验员签章及日期,必要时还应注明箱号、箱体尺寸、净重与毛重。

1.5.15 试制鉴定大纲

包括样品试制鉴定大纲及小批试制鉴定大纲:

(1) 产品基本参数和技术性能指标是否符合有关产品标准的要求。

(2) 提出产品全部性能试验项目、程序及记录表格。

(3) 检验产品主要零部件制造质量及装配质量。

(4) 检查产品外观质量。

(5) 审查产品图样、设计文件的正确性、完整性、统一性。样机试制鉴定重点审查产品图样、设计文件,小批试制鉴定重点审查工艺、工装图样及文件,对在鉴定前已进行过试验并具有试验文件(如试验报告)而又不宜在鉴定时再进行试验的项目,应提出试验报告的编号和名称。

(6) 附鉴定用仪器、工具及材料清单。

(7) 鉴定试验地点。

1.5.16 型式试验报告

型式试验报告是根据产品标准或产品技术条件的要求,对样机(样品)的各项质量指标进行全面检验的文件。通常由具有资质的第三方实验室完成。

(1) 试验台数及产品编号。

(2) 试验依据。

(3) 试验记录。根据产品标准、或产品技术条件进行逐项试验并作记录。

(4) 质量分析。根据试验结果,对产品质量作出结论性评价,对不合格项目初步分析意见。

1.5.17 试用报告

试用报告是通过样机(样品)在实际工作条件下试用结果所编制的文件,为进一步改进设计样机或产品鉴定提供依据。它包括:

(1) (样品)鉴定的依据。

(2) 试用目的、要求。

(3) 试用条件(环境条件、系统情况、设备、仪器)。

- (4) 试用步骤、方法和内容。
- (5) 性能分析。
- (6) 试用时间、结论。
- (7) 试用单位盖章和日期。

1.5.18 试制总结

试制总结是样机试制和小批试制时，对设计和工艺在试制过程中出现和存在的问题、解决方法及试验验证等的分析总结所编制的文件。它包括：

- (1) 试制产品性质（指系列、派生、专用等）。
- (2) 试制时间、数量。
- (3) 关键问题及解决过程。
- (4) 产品图样、设计文件验证情况。
- (5) 材料代用情况。
- (6) 加工、装配质量情况。
- (7) 样机试制结论。

1.5.19 标准化审查报告

标准化审查报告是对新产品在设计、试制过程中贯彻和实施标准化综合要求情况的审查结果的文件。它包括：

- (1) 产品种类、主要用途和生产批量。
- (2) 产品图样、设计文件的正确性、完整性、统一性。
- (3) 产品标准化系数。
- (4) 标准化经济效益。
- (5) 产品主要参数及性能指标符合产品标准情况。
- (6) 贯彻各类标准情况及未贯彻的原因。
- (7) 对新产品标准化情况的综合评价。
- (8) 标准化审查的结论性意见。

1.5.20 产品标准

产品标准是为保证产品的适用性，对产品必须达到的某些或全部要求所制定的标准。

1.5.21 科技查新报告

新产品研制中的关键技术、创新点应提交省市级科技情报单位进行查新检索，并出具科技查新报告。

2 电路设计

设计时所要了解的基本数据和用户要求：供电系统的数据，其中有电压、频率、变压器容量、接地类型等；开关设备的用途是用于进线、母联、馈电、控制电动机、照明还是无功功率补偿等；安装使用场所的环境条件，对防腐性能要求；防护等级；柜体结构；安装方式及其他特殊要求。

2.1 主电路设计

电路设计的基本要求如下：

- (1) 可靠。由于不同类型的负载对供电连续性要求不同，有些允许断电，有些则对供电连续性要求很高，应按在故障时对系统影响最小的原则断开故障部分，并在兼顾用电单位的要求及费用合理的情况下，做到尽可能使可靠性高。
- (2) 安全。正确地选择元器件，在正常情况下监视系统，在故障情况下保护系统，以及能保证操作和维修时人员及设备的安全。
- (3) 灵活。投入或切除某些设备或线路时操作简单，处理事故迅速，检修方便。
- (4) 合理、经济。在满足以上的要求下，方案尽可能简单，选用最少及最适当的设备满足功能要求，达到既合理又经济。

2.1.1 受电主电路和馈电主电路

受电主电路对分断能力要求高，必须选用可靠性高分断能力高于变压器出口短路电流的断路器。馈电回路的断路

器、熔断器的分断能力应高于其安装点的短路电流，受电主电路可以优先考虑选抽出式 [见图 3.17-4 (a)] 既可以提高性能，又节省了隔离元件，还缩小了体积。当考虑体积、经济，断路器的分断能力不足以分断本回路的短路电流时，可在断路器的上口串接高分断能力的熔断器 [见图 3.17-4 (b)]。当对供电连续性要求不高时，馈电回路通常可选用比较经济、体积也较小的方案 (见图 3.17-5)。

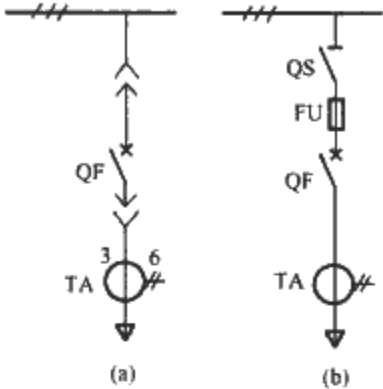


图 3.17-4 受、馈电主电路

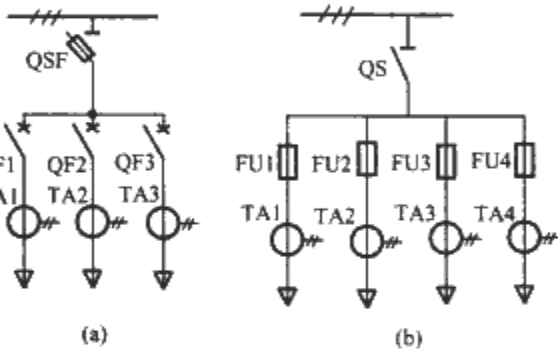


图 3.17-5 馈电主电路

2.1.2 控制电动机主电路

图 3.17-6 所示控制电动机主电路中采用了热继电器做过载保护。图 3.17-6 (a) 是三相电动机的可逆运行主电路，改变相序可使电动机反向旋转，应保留足够的切换间隔，以保证分断电器上电弧可熄灭后，接通电器动作。可以通过在控制回路中接触器常闭触头的联锁，也可以通过机械联锁使

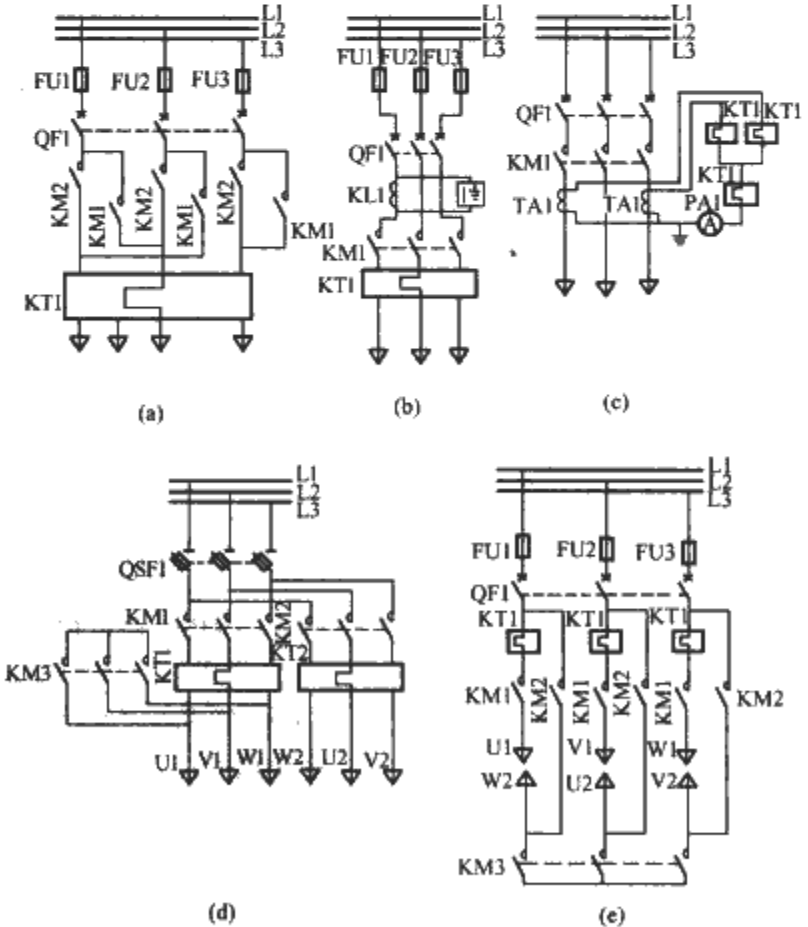


图 3.17-6 控制电动机主电路

- (a) 电动机可逆运行；(b)、(c) 电动机不可逆运行；
- (d) 电动机双速控制；(e) 电动机 Y-△ 起动

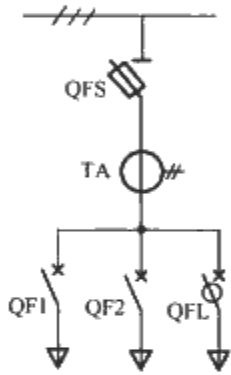
一台接触器闭合时，另一台不能闭合。图 3.17-6 (b)、(c) 是电动机不可逆运行控制主回路，其中图 3.17-6 (b) 增加了漏电保护功能。容量较大的电动机（例如 30kW 以上容量），过载保护可以通过电流互感器进行检测 [见图 3.17-6 (c)]。图 3.17-6 (d) 是电动机双速控制主电路图，双速时额定输出功率和电流不同，热继电器按各自所对应的电动机的额定电流整定，图 3.17-6 (e) 是电动机 Y—△ 起动控制主电路，适用于控制加速过程负载很轻的电动机。热继电器按 $1/\sqrt{3}$ 倍的电动机的额定电流整定。当有与电动机同时投切的补偿电容器时，热继电器按下式整定。当电动机为重要负载时，应安装电动机保护器。电动机控制主电路元件常用熔断器，断路器及接触器、热继电器等元器件。

$$I_e = I_N (\cos \varphi_n / \cos \varphi)$$

式中： I_e 为热继电器的整定电流，A； I_N 为电动机的额定电流，A； $\cos \varphi_n$ 为电动机的功率因数； $\cos \varphi$ 为补偿后的功率因数。

2.1.3 工地用配电箱 (ACS) 主电路

工地用配电箱 (ACS) 主电路 (见图 3.17-7)，按 GB 7251.4 的规定：



- (1) 主进线单元应提供隔离器和过电流保护器件。
- (2) 出线单元。
 - 1) 应具有隔离、负荷开关、过电流保护和间接接触防护设施。这些功能可以由一个或多个器件提供。
 - 2) 不使用钥匙或工具，负荷开关应易于操作。
 - 3) 开关器件的所有极，包括所有的相导体应同时动作。中性导体的配电系统见 IEC 60364—5—53。
- 4) 插座的防护应按照 GB 16895.7

防止直接接触或间接接触。如果 RCD 作为保护设施，一个 RCD 可以保护几个插座。但当 RCD (家用和类似用途的剩余电流动作保护器) 保护的插座超过 6h，应考虑到易于引起无意的跳闸。如果使用 RCD，还应考虑到负载的性质。例如，高频和/或直流分量的出现。防止过电流，其保护器件的额定电流不超过插座的额定电流。一个保护器件可以保护多个插座。

(3) ACS 的所有部件的防护等级至少应为 IP44。通风口和排泄口不应降低其防护等级。门在任何条件下都能够关闭时，门内操作面的防护等级应不低于 IP21。否则，操作面的防护等级则至少应为 IP44。装在 ACS 外部的插座，当插头插拔时，其防护等级应至少等于 IP44。

2.1.4 无功功率补偿主电路

无功功率补偿常用的主电路如图 3.17-8 所示。

无功功率补偿装置的要求：

- (1) 应有放电措施，使电容器在断电后从额定电压峰值放电至 50V，时间不大于 1min。
- (2) 应采取限涌流措施，在投切电容器的瞬时会产生涌流，要限制涌流在 100 倍以下；通常采用 CJ16、CJ19 等切换电容器接触器投切电容器和限制投切瞬间所产生的涌流或采用可控硅过零投切。
- (3) 应设有过电压保护，一般瞬态限制在 2 倍电容器额定电压以下。常用避雷器或其他压敏电器元件来实现；工频过电压保护，当装置的过电压大于 1.1 倍电容器额定电压时，在 1min 内将电容器切除。

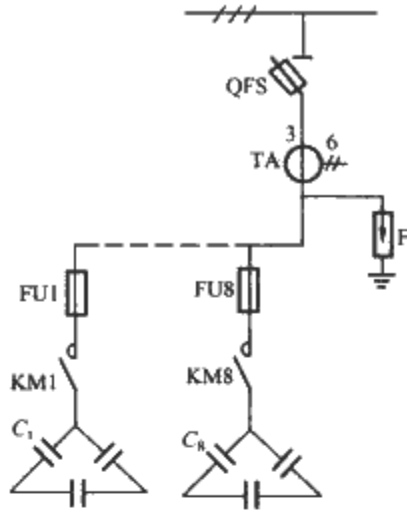


图 3.17-8 无功功率补偿主电路

(4) 装置应设有短路保护，能将故障支路有效隔离。当采用熔断器做支路短路保护元件，熔断器的额定电流应大于 1.43 倍电容器额定电流 (电容器可以在 $1.3I_N$ 下长期工作， $I_N = Q_c \times 10^3 / \sqrt{3}U_N$)。

2.2 辅助电路

控制电路和测量电路简称为辅助电路。控制电路即控制和显示设备的工作状态的电路。测量电路即测量电流、电压、功率 (有功、无功)、功率因数及电能等参数的电路。

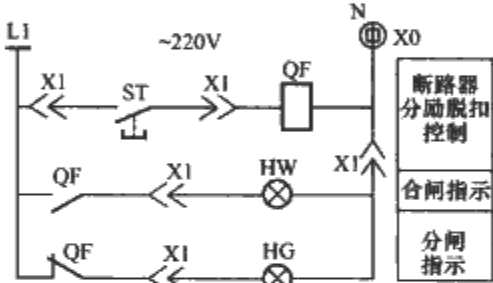


图 3.17-9 控制电路

图 3.17-9 所示为常用的控制电路。图 3.17-10 (a) 所

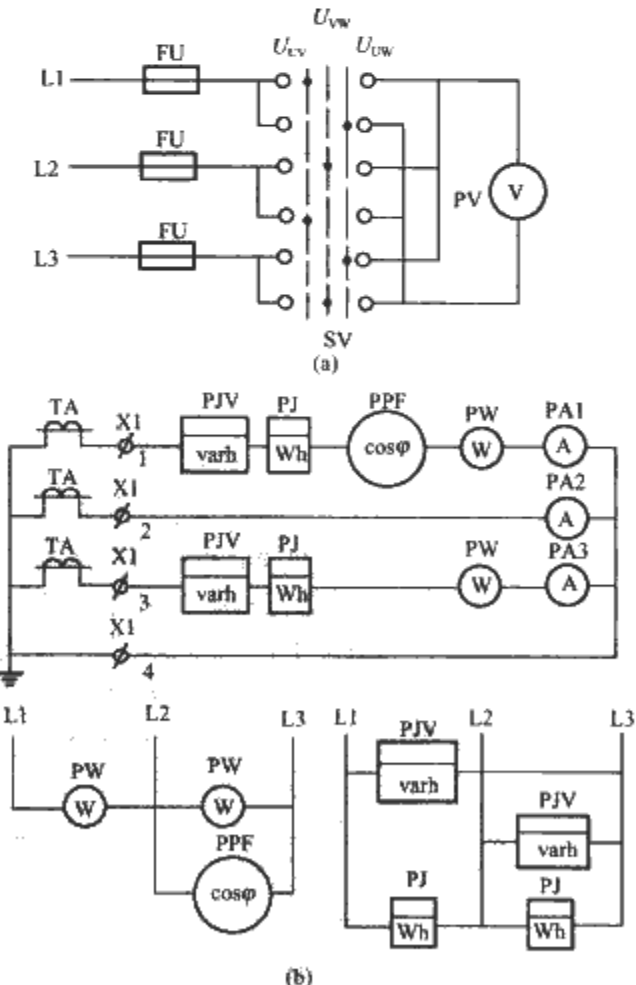


图 3.17-10 参数测量电路

(a) 电压测量电路；(b) 电流、功率、功率因数及电能的测量电路

示为常用电压测量电路，通过转换开关换相、监测三相电压。图 3.17-10 (b) 所示为测量电流、功率（有功、无功）及功率因数的常用电路，根据所需要的测量参数，增减相应的表计，可以满足不同的测量要求。例如当三相平衡时只安装一只电流表测其中一相电流即可。但在三相不平衡电路中，或者是电流表在电路中还起监测三相电路是否断相作用时，则应用三只电流表。有电流量测量的电路应注意电流互感器使用中的有关要求。接线时要注意区别电流互感器的一次侧和二次侧，不能将其接反；电流互感器必须接地；由于电流互感器不能开路，电路中电流互感器应通过接线座与其他表计相连，以便在带电检修时，在断开二次电路前先将电流互感器的二次侧在接线座处短接。另外，注意互感器在主电路中的安装位置，如果测本屏的总电流则应安装在主开关的下口，以便检修，如果是测量系统的电流则应安装在进线开关上口的进线处。

2.3 过电流保护功能

过电流保护可以分为过载保护和短路保护。

2.3.1 过载保护

由于过负荷、谐波或某些故障会产生过电流，使设备和母线超过了允许温升，长时间过电流会损坏设备和导线。过载保护的功能是当超过所允许的过负荷电流值或过负荷时间时断开该电路。

2.3.2 短路保护

短路可能使绝缘损坏或使开关操作产生故障，短路时产生的电弧及很大的热应力和动应力会损坏设备并危及操作人员的安全。短路保护的功能是尽快切除短路电流，把故障限制在最小范围内。

2.3.3 过电流保护器件的保护特性

过电流保护器件主要是由熔断器、断路器、接触器、热继电器元件或其组合构成。

2.3.3.1 熔断器与断路器保护特性的比较

在图 3.17-11 中，表示的是 gG 型熔断器熔断时间特性曲线以及断路器脱扣特性曲线。熔断器额定电流与断路器长延时脱扣器的整定电流大小相同。熔断器的最小分断电流介于额定电流的 1.3~1.6 倍，而断路器长延时脱扣器的最小动作电流是整定电流的 1.2 倍。若使用可调的长延时脱扣器，整定电流以及最小动作电流可以适应持续负载的保护要求，因而其保护效果比熔断器更好。

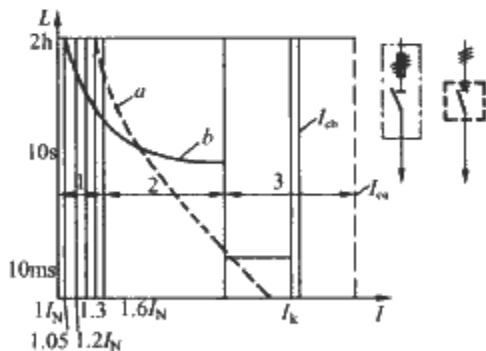


图 3.17-11 熔断器与断路器保护特性曲线

a—熔断器的保护特性曲线；b—断路器的保护特性曲线；
1—最小分断电流范围；2—过载电流范围；3—短路电流范围
 I_m —熔断器额定分断能力； I_{cb} —短路额定分断能力； I_k —安装处最大短路电流

在过载电流的范围内，gG 型熔断器的熔断时间电流特性具有一条比过载脱扣器的保护特性更为陡直的特性曲线。这是电缆与导线过载保护中所优先考虑的特性，在辅助电路中常选用 gG 型熔断器作过载保护。

在短路电流的范围内，当电流刚超过瞬时脱扣器的脱扣电流时，要求断路器的响应比熔断器更快，但是在电流较强的范围内，从熔断器的 I^2t 曲线可知，熔断器可在断路器固有动作时间内分断，比断路器分断更快。在极强的电流下，熔断器可以限制预期短路电流。而当工作电压为 660V 时，熔断器对高于 100kA 的电流有着极强的分断能力。

2.3.3.2 熔断器与断路器组合

为提高供电的可靠性，可以利用断路器能够切断所有极的电流，并且在一次断开后能够立即使电路重新闭合的特点，断路器的长延时脱扣器 a 负责过载保护、瞬时脱扣器 n 负责短路保护，不大于断路器额定分断能力的短路电流由断路器分断。利用熔断器价格低、体积小、分断能力高的特点，在出现较强的短路电流时，由熔断器分断。如图 3.17-12 所示，当电路中某一点的短路电流超过该点上断路器的额定分断能力，则把高分断能力的熔断器连接在断路器进线端。

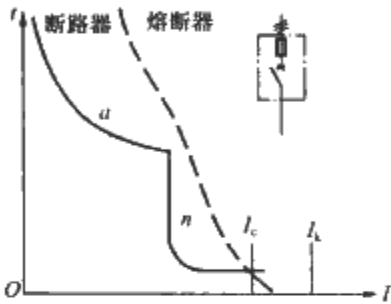


图 3.17-12 熔断器与断路器组合

I_c —额定分断能力； I_k —安装处最大短路电流

2.3.3.3 带瞬时脱扣器的起动用断路器、接触器和热继电器的组合

图 3.17-13 中，热继电器提供过载保护，断路器提供短路保护。断路器的瞬时脱扣器的动作电流整定到可以满足起动条件且能对较小短路电流起到短路保护作用的最低值。当发生故障时，可以根据断路器是否分断来判断是短路还是过载故障。

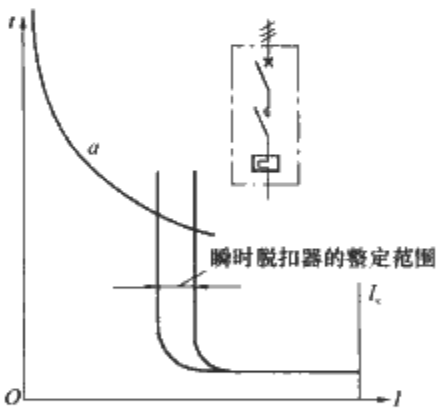


图 3.17-13 带瞬时脱扣器的断路器、接触器和热继电器的组合

a—热继电器的保护特性曲线； I_c —断路器的额定分断能力

2.3.3.4 断路器串联组合

在图 3.17-14 中，断路器 QF1 的额定电流按其工作电

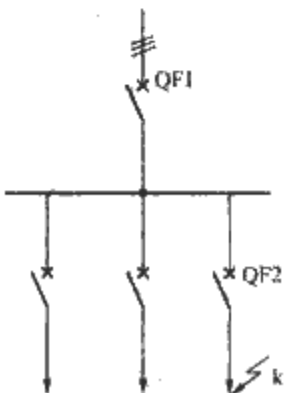


图 3.17-14 断路器串联组合

流来选择，它可以作多馈出线的主开关。只有当下级断路器的进线或本身出现附近短路时，QF1 才断开。断路器 QF2 负责本支路的过载和短路保护。

2.3.3.5 带长延时脱扣器和瞬时脱扣器的断路器与接触器组合

在图 3.17-15 中，断路器负责过载器和短路保护，接触器负责电路的正常通断。这时，断路器的适用条件为熔断器、接触器与热继电器组合时熔断器的使用条件。

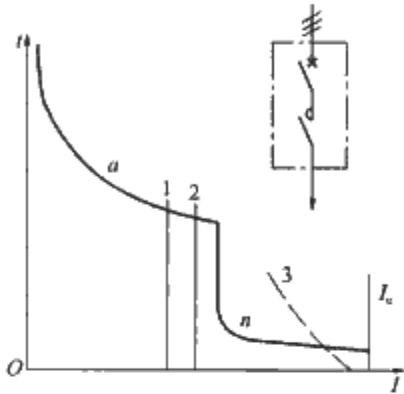


图 3.17-15 断路器与接触器组合
a—长延时保护特性曲线；n—瞬时保护特性曲线；
I_c—断路器额定分断能力；
1—接触器的分断能力；2—接触器的接通能力；3—接触器的触头发生熔焊，但尚能打开条件下的动作曲线

2.3.3.6 熔断器、接触器与热继电器组合

接触器用于电动机的远距离切换，热继电器负责电动机、电缆及接触器的过载保护。熔断器则是对接触器、热继电器、电缆及电动机进行短路保护。因此，需要对所用保护器件的特性和有效范围进行选配，如图 3.17-16 所示。应注意以下几点：

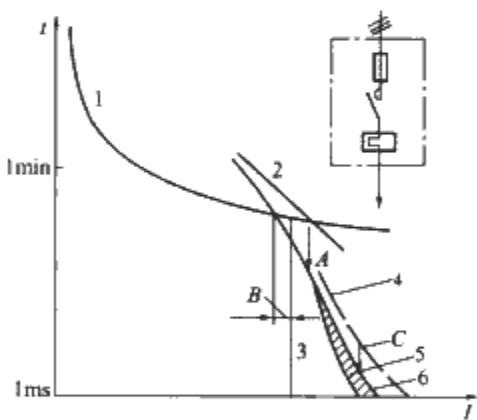


图 3.17-16 熔断器、接触器与热继电器组合
1—热继电器保护特性；2—热继电器的破坏特性；3—接触器的分断能力；4—接触器触头发生熔焊但尚能打开条件下的动作曲线；5—熔断器的熔化特性；6—熔断器的熔断特性；A、B、C—一定短路条件下的安全裕量

(1) 热继电器和熔断器的保护特性必须做到电动机在未达到额定转速前不动作。熔断器应选 am 型，能允许电动机的正常起动并在接触器触头不出现熔焊的条件下完成短路保护。

(2) 熔断器能保护热继电器不承受超过其额定电流 10 倍以上的电流，以保证热继电器不被烧毁。还必须切断接触器所无法分断的电流，并且能在短路情况下保护接触器，保证接触器的触头不发生熔焊。

2.4 选择性保护

选择性保护是指在最短时间内只有与故障点最近的保护电器动作。

开关电器和保护电器的最佳协同工作的前提是导线和设备的选择性工作方式。每个支路每台电器应尽可能受到过载和短路保护。当发生故障时，保护电器必须在最短时间内将发生故障的支路切除，而其他支路仍正常供电，把受故障影响的负载减到最少，下级故障应下级保护电器动作，不得越级动作。因此，保护电器的动作必须相互配合具有选择性。

实现选择性的依据：

- (1) 时间分级配合。仅依据分断动作时间的长短。
- (2) 电流分级配合。仅依据动作电流值的大小。
- (3) 与电流有关的时间分级配合。分断动作时间分级配合与动作电流分级配合的结合。

2.4.1 串联熔断器之间的选择性

电路承载的工作电流不同，其导线的截面和保护熔断器的额定值也不相同。但在发生短路故障时，流过所有串联熔断器的电流却是相同的。

满足选择性要求的基本条件是只要串联熔断器的保护特性曲线（应包括其偏差范围）不相交，并且有足够的间隔距离，如图 3.17-17 所示。但当短路电流较大时，还必须保证下级熔断器熔断和灭弧过程中的 I^2t 总值小于上级熔断器的 I^2t 值时，才能满足选择性要求。

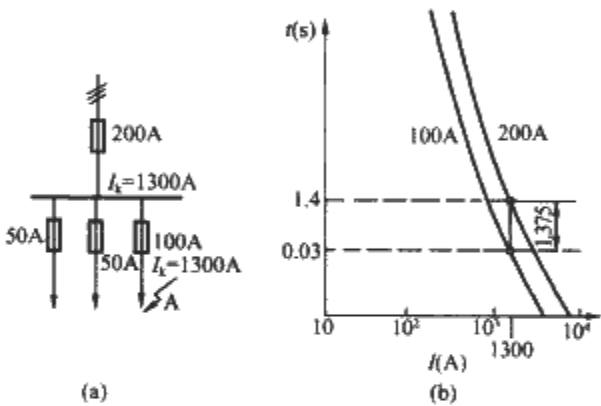


图 3.17-17 串联熔断器之间的选择性
(a) 典型电路；(b) 特性曲线

2.4.2 串联断路器之间的选择性

(1) 利用瞬时脱扣器工作电流的分级实现选择性。只有在相应位置上的预期短路电流值相差很大的条件下，才可以用这种分级的方法实现选择性。电源侧断路器的动作电流整定值，必须高于下一级断路器安装位置上的最大预期短路电流，如图 3.17-18 所示。

(2) 利用短延时脱扣器实现选择性。如果因为连接导体阻抗使各断路器安装位置之间的预期短路电流值相差甚小，便只能借助短延时脱扣器延迟电源侧断路器的动作来满足选择性要求。这种脱扣器的动作延迟应保证下级断路器能分断

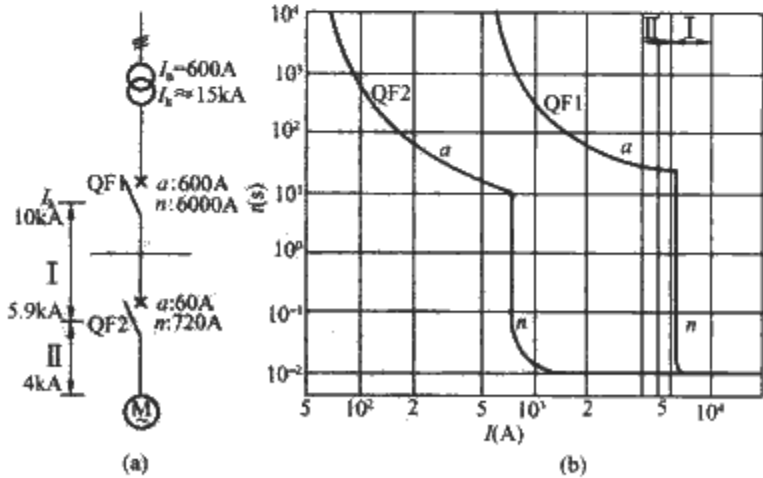


图 3.17-18 两台串联断路器之间的选择性
(a) 典型电路；(b) 保护特性曲线
a—长延时保护特性；n—瞬时保护特性

短路电流。另外，短延时脱扣器的动作电流整定值最小等于下级断路器动作电流的 1.25 倍。为降低发生全短路（即下级断路器的进线或电源侧断路器的出线处短路）时电源侧断路器受到的短路影响，可在短延时脱扣器之外再配置一个瞬时脱扣器。该瞬时脱扣器的整定值，应保证它只在发生全短路时才会动作。限流断路器由于在短路电流等于或大于其瞬时脱扣器的整定电流值时，便会迅速分断，不适用于在和下级断路器配合的选择性保护中。

2.4.3 断路器和下级熔断器之间的选择性

过载时，当电流未达到断路器的瞬时脱扣器整定电流值时，只要熔断器的保护特性曲线不与延时脱扣器的保护特性曲线相交，便可满足选择性要求，如图 3.17-19（a）所示。

短路时，当短路电流达到或超过瞬时脱扣器整定电流值时，熔断器必须能将短路电流限制到脱扣器动作电流值以下才能满足选择性要求。这只有在熔断器额定电流比断路器低得多的情况下才能做到。一般只要短延时脱扣器的延时时间比熔断器的时间长 100ms，就能满足选择性要求，如图 3.17-19（b）所示。

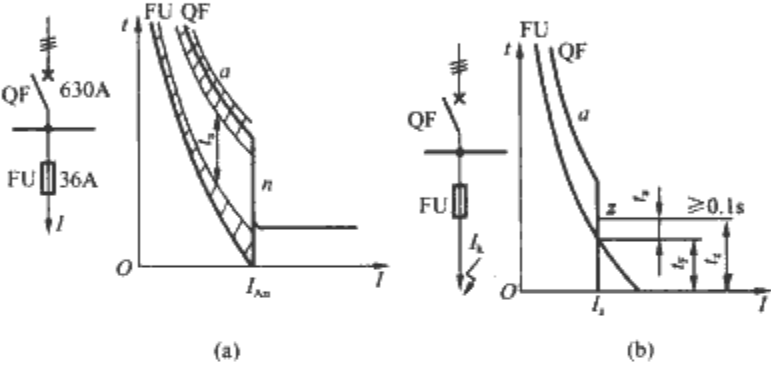


图 3.17-19 断路器和下级熔断器之间的选择性

（a）过载段内的选择性；（b）短路段内的选择性

FU—熔断器的保护特性；QF—断路器的保护特性；a—长延时段保护特性；z—短延时段保护特性； I_{An} —瞬时脱扣器 n 动作电流； t_s —安全区； I_z —z 型脱扣器动作电流； t_F —熔断器的熔断时间； t_z —z 型脱扣器的延时时间

2.4.4 熔断器和下级断路器之间的选择性

过载时，只要长延时脱扣器的保护特性曲线（包括误差带）不与熔断器的保护特性曲线 [见图 3.17-20（a）] 相交，便能满足选择性要求。

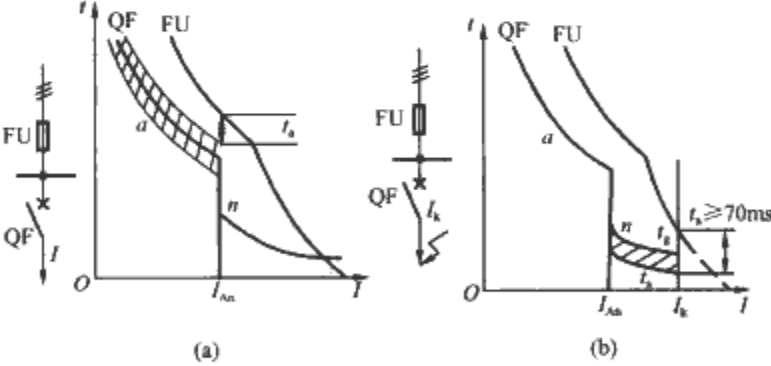


图 3.17-20 熔断器与下级断路器之间的选择性

（a）过载段内的选择性；（b）短路段内的选择性

t_a —断路器的动作时间； t_g —断路器的分段时间

短路时，即使在断路器燃弧过程中，电流仍会造成熔断器发热。但只要熔断器的保护时间比断路器的瞬时保护动作时间延长 70ms [见图 3.17-20（b）]，便可以满足选择性要求。

3 元器件选择

计算出电器元件的最大工作电流、电压，所在位置短路点的最大短路电流，以及电器元件正常运行所需要满足的特殊参数，为选择主母线、导线及元器件的型号和规格提供

数据。

3.1 计算元件的最大允许工作电流、电压

（1）根据系统电压的变化及电器元件的最大允许工作电压，计算出电器元件的最大工作电压。

（2）根据主要电器元件的最大允许工作电流，计算出电器元件的最大工作电流。

3.2 短路电流的近似计算方法

额定短时耐受电流值是根据设备安装处可能承受的最大短路电流来确定，由于电力系统的容量大大超过成套装置安装场所的电力负荷容量，一般情况下，可以设系统为无穷大电源，且不计电动机负载和电容器的反馈电流，按最严重的故障情况三相短路计算短路电流，其短路阻抗应包括从所设的短路点到变压器的母线阻抗、开关电器的接触电阻及变压器的阻抗。

3.2.1 决定短路电流大小的主要因素

（1）短路的类型。单相接地、相间及三相短路等，最严重的是三相短路，三相短路时的短路电流最大。通常相间短路是三相短路的 0.87 倍左右，单相接地短路是三相短路的 0.5 倍左右。

（2）变压器的容量。短路电流与变压器的容量成正比。

（3）变压器的阻抗电压。短路电流与变压器的阻抗电压成反比。

（4）短路点到变压器的阻抗。短路电流与变压器的阻抗电压成反比。

3.2.2 不同变压器的容量、不同阻抗时的短路电流

表 3.17-8 给出了用于开关设备设计的数据，变压器出线端额定工作电压为 400V 变压器的阻抗电压 $U_k=4\%$ 和 $U_k=6\%$ 时的三相交流、功率为 50~3150kVA 变压器的额定电流与最大短路电流 I_k 。将额定工作电压 400V 时的额定电流与最大短路电流去除以 1.73（即 $\sqrt{3}$ ）则可获得相同容量变压器在 690V 时的数据。

表 3.17-8 额定工作电压 400V，变压器的额定电流 I_N 与最大短路电流 I_k

变压器容量 S_N (kVA)	额定电流 I_N (A)	最大短路电流 I_k (kA)	
		$U_k=4\%$	$U_k=6\%$
50	72	1.805	1.203
100	144	3.61	2.41
200	288	7.22	4.812
250	360	9.025	6.05
315	455	11.375	7.58
400	578	14.45	9.63
500	722	18.05	12.03
630	910	22.75	15.116
800	1156	28.9	19.26
1000	1444	36.1	24.06
1250	1805	45.125	30.08
1600	2312	57.8	38.53
2000	2890	72.25	48.167
2500	3613	90.325	60.217
3150	4552	113.8	75.867

3.3 主要电器元件的选择

(1) 元器件的选择应符合 GB 7251.1 的规定。

(2) 元器件的选择应满足使用环境条件下正常运行、检修、短路和过电压的要求。

(3) 元器件的允许最高工作电压不得低于该回路的最高运行电压。

(4) 元器件的长期允许电流不得低于该回路的最大持续工作电流。

(5) 元器件应满足短路条件下的动稳定、热稳定的要求。用于开断短路电流的电器，应满足短路条件下的通断能力。

(6) 元器件必须符合其产品标准的要求，其额定电压、电流、频率、使用寿命、接通和分断能力、短路耐受强度、外形尺寸等应符合成套设备的技术及结构设计。

3.3.1 断路器的选用

断路器的选用应根据具体使用条件选择使用类别，选择额定工作电压、额定电流、脱扣器整定电流和分励、欠电压脱扣器的电压电流等参数，参照产品样本提供的保护特性曲线选用保护特性，并需对短路特性进行校验。

3.3.1.1 断路器型式选择

(1) 持续工作电流在 1000A 及以上的回路通常选择框架式断路器。

(2) 持续工作电流在 1000A 以下的回路通常选择塑壳式断路器。

(3) 当配电变压器容量较大或末端配电箱距配电变压器较近时，末端微型断路器的上级断路器宜选用限流型塑壳式断路器。

(4) 对较长的配电线路，宜选择非限流型断路器。

3.3.1.2 额定电流

断路器的额定电流及过电流脱扣器额定电流均大于回路的持续工作电流。当断路器安装在不利于散热的条件（外壳或环境）下，应注意制造厂提供的约定封闭发热电流或降容系数。

3.3.1.3 额定短路分断能力

额定短路分断能力：额定极限短路分断能力（ I_{cu} ）与额定运行短路分断能力（ I_{cs} ）两个参数。

用于断开短路电流的电器，应满足短路条件下的通断能力，应不低于其安装位置上的预期短路电流。当动作时间大于 0.02s 时，可不考虑短路电流的非周期分量，即把短路电流周期分量有效值作为最大短路电流；当动作时间小于 0.02s 时，应考虑非周期分量，即把短路电流第一周期内的全电流作为最大短路电流。仅从切断短路电流的角度讲，用断路器额定极限短路分断能力校验短路开断能力就能满足要求。额定极限短路分断能力是不包括继续承载其额定电流能力的分断能力，如果用额定极限短路分断能力来选择断路器的短路分断能力，如发生短路，故障回路的断路器开断最大的短路电流后，则该台断路器不能继续运行，需要更换断路器，影响系统的可靠性。如用额定运行短路分断能力来选择断路器短路分断能力，由于额定运行短路分断能力包括断路器继续承载其额定电流能力的分断能力，断路器开断最大的短路电流后，则该台断路器可以继续运行，从可靠性及经济上都比较好。通常按额定运行短路分断能力来选择断路器短路分断能力。

3.3.1.4 断路器脱扣器的选择

(1) 脱扣器类型选择。

1) 线路末端的断路器，通常选用具有瞬时、长延时保护的过电流脱扣器。

2) 配电干线的断路器通常选用具有瞬时、短延时、长延时过电流保护的脱扣器。

3) 变压器低压侧主进线断路器、母线分段断路器，通常选择短延时、长延时过电流脱扣器。通过短延时保护与配出回路的瞬时保护配合，实现选择性配合。与设置瞬时保护相比，这样不仅延长了短路电流热效应、电动力效应的作用时间，也延长变压器高压侧过电流保护的動作时限。对于重要负荷通常增设瞬时脱扣器，即选用瞬时、长延时脱扣器。通过瞬时脱扣器与配出回路的瞬时脱扣器配合。这样不仅保障了选择性、缩短了自压侧过电流保护的動作时限，同时也缩短了短路电流效应的作用时间。

4) 在下列情况之一时，宜选择智能化脱扣器或控制单元：①变电所采用综合自动化系统时，对低压总断路器、分断断路器、配电干线断路器宜采用智能化脱扣器或控制单元；②为保证选择性动作，上下级断路器之间需要采用逻辑配合时。

(2) 线路末端微型断路器脱扣器脱扣特性选择。

1) 用于工业及民用建筑的光源为白炽灯、卤钨灯等电阻性负载的照明线路保护的型断路器宜选择 B 型特性。

2) 用于配电线路及气体放电光源的照明线路保护的微型断路器宜选择 C 型特性。

3) 用于空调器、电冰箱、排风机等线路保护的微型断路器宜选择 D 型特性。

4) 用于小功率电动机线路保护的微型断路器宜选择 K 型特性。

(3) 断路器的动作电流、动作时间整定值。

1) 长延时脱扣器整定电流应大于或等于线路的计算负载电流，可按计算负载电流的 1~1.1 倍确定；同时应不大于线路导体长期允许电流的 0.8~1 倍。3 倍长延时动作电流整定值的可返回时间等于或大于线路中最大起动电流的电动机起动时间。

2) 瞬时或短延时脱扣器的整定电流所选断路器的瞬时或短延时脱扣器整定电流应大于线路尖峰电流，配电断路器可按不低于尖峰电流的 1.35 倍的原则确定，电动机保护电路当动作时间大于 0.02s 时可按不低于 1.35 倍起动电流，如果动作时间小于 0.02s，则应为不低于 1.7~2 倍起动电流的原则确定。这些系数是考虑整定误差和电动机起动电流可能变化等因素。

3) 短延时动作电流整定值大于或等于 $1.1(I_{jx} + 1.35K I_{MN})$ ，其中， I_{jx} 为线路计算负载电流， K 为电动机的起动电流倍数， I_{MN} 为电动机额定电流。

4) 瞬时电流整定值大于或等于 $1.1(I_{jx} + K_1 K I_{MN0})$ ，其中， K_1 为电动机起动电流的冲击系数，一般取 $K_1 = 1.7 \sim 2$ ； I_{MN0} 为最大的一台电动机的额定电流。

5) 短延时的时间阶梯，按配电系统的分段而定。一般时间阶梯为 2~3 级。每级之间的短延时时差为 0.1~0.2s 视断路器短延时机构的动作精度而定，其可返回时间应保证各级的选择性动作。选定短延时阶梯后，最好对被保护对象的热稳定性能加以校核。

6) 漏电断路器的剩余动作电流。如果是进行人身保护，则选用剩余动作电流 30mA 较为安全，如果是为了保安防火，防电气设备漏电，则可考虑选用 50~100mA 的剩余电流动作断路器。

3.3.1.5 剩余电流动作保护或漏电附件型式的选择

(1) 对于安全要求较高的建筑、场所、部位、设备宜选择电磁式剩余电流动作保护。对于一般建筑、场所、部位、设备可选择电子式剩余电流动作保护。

(2) 对用于保护电子设备的断路器,应根据电路中直流分量的性质选择剩余电流保护的動作特性。当电路中存在脉动直流分量时,宜选择 A 型或 B 型剩余电流动作特性的保护装置,当电路中存在平滑直流分量时,宜选 B 型剩余电流动作特性的保护装置,用于其他一般配电线路保护的断路器,宜选择 AC 型的剩余电流动作保护。

3.3.1.6 断路器分励和欠电压脱扣器的选择

分励和欠电压脱扣器的额定电压应等于线路额定电压。

(1) 在下列情况之一时,宜选择失电压脱扣器。

1) 双电源切换断路器需装设延时的失电压脱扣器。

2) 在电源切换过程中,需要切除的次要负荷的断路器,需要装设瞬时动作的失压脱扣器。

3) 对于不允许自起动的次要电动机,其断路器宜装设瞬时动作的低电压保护。对不需要自起动的重要电动机,其断路器应装设带延时的失压脱扣器。

(2) 在下列情况之一时,宜选择分励脱扣器。

1) 在火灾发生时,需要切除的非消防负荷的断路器宜装设分励脱扣器。

2) 需要在远方切断电源的断路器,宜装设分励脱扣器。

3.3.1.7 漏电断路器的选用

漏电断路器具有两个功能:①具有断路器的功能;②具有漏电保护的功能。

断路器功能与一般低压断路器相同,漏电保护部分通过零序互感器检测的是剩余电流,即通过检测被保护回路内相线和中性线的电流瞬时值,判断对地泄漏电流的变化。因此,断路器功能部分的选择与一般低压断路器相同。漏电保护功能部分(下称漏电保护器)的选择,应考虑两个基本条件:一是漏电保护器的漏电动作电流必须躲过电网正常泄漏电流;二是漏电保护器的漏电动作电流必须小于引起火灾的最小点燃电流或人体安全电流,按选用漏电保护器的主要目的确定。通常按以下原则选择:

(1) 选择漏电保护器的额定动作电流应根据电气线路的正常泄漏电流确定,并应充分考虑到被保护线路和设备可能发生的正常泄漏电流值,必要时可通过实际测量取得被保护线路和设备的泄漏电流值。

(2) 漏电保护器的额定漏电不动作电流应不小于电气线路和设备的正常泄漏电流的最大值的 2 倍。

(3) 电气线路和设备泄漏电流值与分级安装的漏电保护器特性应配合。

1) 用于单台用电设备时,漏电保护器动作电流应不小于正常运行实测泄漏电流的 4 倍。以防止因漏电引起触电事故和火灾。

2) 配电线路的漏电保护器动作电流应不小于正常运行实测泄漏电流的 2.5 倍,同时还应满足其中泄漏电流最大的一台用电设备正常运行泄漏电流的 4 倍,以防止因漏电引起火灾。

3) 用于全网保护时,动作电流应不小于实测泄漏电流 2 倍。为全网增设全面的漏电保护,防止因漏电引起火灾。

(4) 通常不同额定剩余动作电流的漏电保护器可按以下原则选用。

1) 额定剩余动作电流为 30mA 及以下的漏电保护器,用于对直接接触(人身保护)及 TT 系统的保护,及不直接接触、IT 中性线不接地系统和完全暴露条件下工作(如建

筑工地、游泳池、娱乐场所)设备的保护。

2) 额定剩余动作电流为 50mA 及以上的漏电保护器,用于对非直接接触及 TT 系统及防止火灾的保护。

3) 配置选择性保护时,应保证除对非直接接触及 IT 系统可保护外,还能对下级装有 30mA 的漏电保护系统作选择性保护,仅隔离事故电路,其他电路仍应保证继续供电。

3.3.2 熔断器的选用

熔断器在低压配电系统中,主要用于配电线路和电气设备的短路保护。

熔断器的主要参数有额定电压、额定电流、额定分断电流等,当有上、下级熔断器选择性配合要求时,应考虑过电流选择比。选用时,首先应根据实际使用条件确定熔断器的类型,包括选定合适的使用类别和分断范围,在保证使熔断器的最大分断电流大于线路中可能出现的峰值短路电流有效值的前提下,选定熔体的额定电流。同时应使熔断器的额定电压不应低于线路额定电压。但当熔断器用于直流电路时,应注意制造厂提供的直流电路数据或与制造厂协商,否则应降低电压使用。

3.3.2.1 按熔断器工作类型选用

(1) g 类。全范围分断,连续承载电流不低于额定电流,可分断最小熔断电流至额定分断电流之间的电流。

(2) a 类。部分范围分断,连续承载电流不低于额定电流,只能分断低倍额定电流至额定分断电流之间的电流。

3.3.2.2 按使用类别选用

(1) G 类。一般用途,可用于保护包括电缆在内的各类负载。

(2) M 类。保护电动机回路用。

上述两种分类还有不同的组合,例如为 gG 类、aM 类。

全范围熔断器(g 类熔断器)兼有过电流保护功能,主要用作配电主干线路及电缆、母线等的短路保护和过电流保护;而部分范围熔断器(a 类熔断器)的作用,主要用于照明线路和电动机等设备的短路保护。由于低倍过电流不能使这种熔断器动作,故在使用这种熔断器时,应另外配用热继电器等过电流保护组件。

选择熔断器的类型时,要依据负载的保护特性和预期短路电流的大小。一般是考虑它们的过电流保护,选择熔体的熔化系数适当小些,宜采用熔体为铅锡合金的熔丝;而大容量的照明线路和电动机,主要考虑短路保护及短路时的分断能力,此外还应考虑加装过电流保护;当短路电流较大时,宜采用具有高分断能力的 RL 系列螺旋式熔断器;当短路电流相当大时,宜采用有限流作用的 RT (NT) 系列高分断能力熔断器。保护半导体常用的熔断器有 RS、NGT 和 RLS 系列,当回路中装有低压断路器时,尚应考虑两者动作特性的配合问题。

3.3.2.3 熔体额定电流的确定

3.3.2.3.1 一般用途熔断器的选用

用于保护负载电流比较平稳的照明或电热设备,以及一般控制电路的熔断器,其熔体额定电流一般按线路计算电流确定。用于保护电动机的熔断器,应按电动机的起动电流倍数考虑躲过电动机起动电流的影响,一般选熔体额定电流为电动机额定电流的 1.5~3.5 倍;对于不经常起动或起动时间不长的电动机,选较小倍数;对于频繁起动的电动机选较大倍数;为防止发生越级熔,上、下级(即供电干、支线)熔断器间应有良好的协调配合,宜进行较详细的整定计算和校验。在短路电流段内,当电流刚刚超过断路器的瞬动脱扣器的动作电流时,断路器的响应比熔断器快;但当电流进一

步增加时，熔断器的熔断速度又比断路器的动作速度快了。当电流非常大时，熔断器还有限制预期短路电流的作用。

3.3.2.3.2 快速熔断器的选择

快速熔断器的选择与其接入电路的方式有关，以三相硅整流电路或三相晶闸管电路为例，快速熔断器接入电路的方式常见的有接入交流侧和接入整流桥臂（即与硅组件相串联）两种，如图 3.17-21 所示。

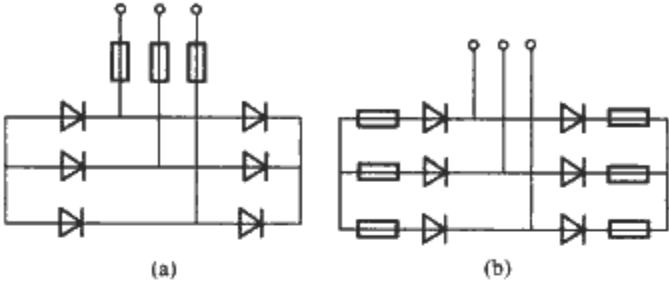


图 3.17-21 快速熔断器接入整流电路方式
(a) 接入交流侧；(b) 接入整流桥臂

(1) 熔体的额定电流选择。选择熔体的额定电流时，应当注意快速熔断器熔体的额定电流是以有效值表示的，而硅整流组件和晶闸管的额定电流却是用平均值表示的。

1) 当快速熔断器接入交流侧时，熔体的额定电流为

$$I_{FN} \geq K_1 I_{zmax}$$

式中： I_{FN} 为熔体的额定电流； I_{zmax} 为线路中最大整流电流； K_1 为与整流电路的形式及导电情况有关的系数，若用于保护硅整流组件时， K_1 值见表 3.17-9，若用于保护晶闸管时 K_1 值见表 3.17-10。

2) 当快速熔断器接入整流桥臂时，熔体的额定电流为

$$I_{FN} \geq 1.5 I_{gN}$$

式中： I_{gN} 为硅整流组件或晶闸管的额定电流（平均值）。

(2) 快速熔断器额定电压的选择。快速熔断器分断电流的瞬间，最高电弧电压可达电源电压的 1.5~2 倍。因此，硅整流组件或晶闸管的反向峰值电压必须大于此电压值才能安全工作，即

$$U_F \geq K \sqrt{2} U_{FN}$$

式中： U_F 为硅整流组件或晶闸管的反向峰值电压； U_{FN} 为快速熔断器额定电压； K 为安全系数，其值通常为 1.5~2。

采用快速熔断器保护虽然具有结构简单、价格低廉、维修方便等特点，但也有局限性，主要是更换比较麻烦，故适用于负载波动不大、事故不多的场合。在负载波动大且事故较多的场合，宜采用快速断路器代替快速熔断器。

表 3.17-9 不同形式整流电路的 K_1

电路形式	单相半波	单相全波	单相桥式	三相半波	三相桥式	双星形 6 脉波
K_1	1.57	0.785	1.11	0.575	0.816	0.29

表 3.17-10 不同形式整流电路及不同导通角时的 K_1

导通角 电路形式	180°	150°	120°	90°	60°	30°
单相半波	1.57	1.66	1.83	2.2	2.78	3.99
单相桥式	1.11	1.17	1.33	1.57	1.97	2.82
三相桥式	0.816	0.828	0.865	1.03	1.29	1.88

3.3.3 隔离开关的选用

隔离开关主要根据回路额定电压、长期工作电流以及短时耐受电流来选择。组合电器应考虑隔离开关和熔断器的要求来选择，根据用电设备的容量正确选择熔断体的等级及熔

体的额定电流。如果组合电器装设在近电源端作配电保护电器，应选用带高分断能力的熔断器组合电器。如果用于不频繁操作电动机，则需按工作电流计算能控制的电动机的容量以及考虑到在 AC-3 工作制的能力。

3.3.4 交流接触器的选用

3.3.4.1 用于控制电动机负载

接触器的额定工作电压、电流（功率）和额定操作频率均不得低于电动机的相应值。当用于断续周期工作制或短时工作制时，接触器的额定发热电流应不低于电动机实际运行的等效电流。此外，应按电动机的类型和实际使用的要求，选用有相应使用类别技术数据的接触器。

3.3.4.2 用于控制非电动机负载

(1) 控制电热设备。一般按接触器的 AC-1 使用类别的额定工作电流等于或大于电热设备的额定电流选用。电热设备一般为多路单极并联运行，可将多极接触器并联，以提高其允许负载电流。三极并联时，长期载流能力可增至 2.5 倍；两极并联时，可增至 1.8 倍。

(2) 控制电容器。切换电容器接触器是专用于低压无功补偿设备中投入或切除并联电容器组，以调整用电系统的功率因数。切换电容器接触器带有抑制浪涌装置，能有效地抑制接通电容器组时出现的合闸涌流对电容器的冲击和开断时的过电压，常用产品有 CJ16、CJ19 等系列。接触器的额定工作电流应不小于电容器的长期工作。电容器可以在 $1.3 I_N$ 下长期工作 $I_N = Q_c \times 10^3 / \sqrt{3} U_N$ 。

(3) 控制照明装置。如照明装置的灯具为放电灯或白炽灯，则分别按交流接触器的 AC-5a 或 AC-5b 的额定工作电流不小于相应灯具的额定工作电流选用。

(4) 控制电磁铁。应根据电磁铁的额定电压、电流、通电持续率、时间常数及功率因数等主要技术参数选用接触器。直流起重电磁铁属于高电感负载，时间常数特别大，为了保证使用可靠，常在电磁铁线圈两端并联一个电阻，其电阻值不大于电磁铁线圈电阻值的 5 倍。

3.3.5 热继电器的选用

热继电器主要是根据被保护电动机工作环境温度、起动情况、负载性质、允许过载能力、接线方式以及工作制等选用的。热继电器的正确选用和电动机的工作制关系最为密切。

保护不间断或 8h 工作制电动机时的选用：

(1) 根据电动机的起动时间，选取对应电动机起动电流（一般为电动机起动电流的 6~7 倍）下具有所要求可返回时间的热继电器，通常热继电器在电动机起动电流下的可返回时间 t_F 与动作时间 t_p 的关系式为

$$t_F = (0.5 \sim 0.7) t_p$$

(2) 通常选取热继电器的电流整定值为电动机额定电流的 0.95~1.05 倍，或选取热继电器的整定电流范围的中值约等于电动机额定工作电流。

(3) 热继电器作为断相保护时的选用方法。对于 Y 接法电动机，一相断线后流过热继电器的电流与流过电动机绕组的电流增加比例不相同，其中最严重一相的绕组电流要比另外两相串联绕组电流大一倍。故应该选用带断相保护的热继电器。热继电器断相保护的选用与电动机实际负载的大小有关。据分析，对于 Δ 接法的小容量笼型感应电动机，一般只有在电动机的 50%~67% 额定功率的负载下运行而要求断相保护时，才需选用带断相保护的热继电器，当负载大于 67% 时，即使选用不带断相保护的热继电器，也能起到

断相保护的作用，而当负载小于 50% 额定功率时，由于电流较小，即使断相，电动机也不会损坏。如将不带断相保护的三极热继电器的整定电流整定为电动机额定电流的 56%，将热继电器的三个热元件分别串联在△接法电动机的各相绕组内，则该不带断相保护的三极热继电器也能起到断相保护的作用。

(4) 保护断续周期工作制的电动机时热继电器的选用。热继电器用于断续周期工作制的电动机时，仅有一定的适应性。当电动机的起动电流约为额定电流的 6 倍，起动时间为 1s，电动机在满载工作且通电持续率为 40% 时，每小时操作次数最高不超过 40 次，要求更高的操作频率时，可选用带速饱和电流互感器的热继电器。对于类似 JR16 系列的复合加热式热继电器，可根据电动机的起动电流倍数、起动时间和通电持续率，通过作图法求出每小时允许操作次数。

3.3.6 测量用电流互感器的选用

测量用电流互感器时要考虑其准确度级次，常用 0.2 和 0.5 级。还要注意其带负载的能力，所接仪表的内阻与连接导线的电阻之和不能大于互感器的额定二次负载。

3.4 母排的选择

(1) 选择母线的材料。母线的材料主要选铜和铝，一般用铜材料较多。母线截面形状的选择应考虑集肤效应、邻近效应、电磁波渗透深度等因素的影响，并要求散热良好、机械强度高、安装简单和连接方便。成套开关设备用母线一般选矩形，为增加散热面积，减少集肤效应的影响，并兼顾机械强度，母线的边比通常选择 1/12~1/5。

(2) 截面积、根数、排列方式。母排的截面积不仅与其承载电流有关，还应考虑母排的安装、敷设方式、与其连接的元件的种类及其出线尺寸、所承受的机械应力。为避免集肤效应过大，单根母线的截面积不应大于 1000~1200mm²。当单根母线不能满足载流量要求时，每相可用两根或三根矩形母线，两根间的距离一般应等于（或大于）其单根的厚度，以保证散热良好。每相母线的允许电流当根数增加时不能成倍增加，与其散热有关，当每相用三根时，中间一根的电流约占 20%，两边各占 40%，这也是一般不采用四根以上母线的原因。

3.5 中性线（N）、PEN 及保护导体（PE）截面积的选择

3.5.1 中性线 N 及 PEN 导体截面积的选择

如果相导线的截面积超过 10mm²，中性线则等于相导线载流量的一半，但不能小于 10mm²。PEN 导体截面积的选择与中性线截面积的选择方法相同。

3.5.2 保护导体截面积的选择

(1) 保护导体（PE、PEN）的截面积不应小于表 3.17-11 中给出的值。如果表 3.17-11 用于 PEN 导体，在中性电流不超过相电流的 30% 的前提下是允许的。如果应用此表得出非标准尺寸，那么，应采用最接近的较大的标准截面积的保护导体（PE、PEN）。只有在保护导体（PE、PEN）的材料与相导体的材料相同时，表 3.17-11 中的值才有效。如果材料不同，保护导体（PE、PEN）截面积的确定要使之达到与表 3.17-11 相同的导电效果。对于 PEN 导体，最小截面积应为 10mm²（铜）或 16mm²（铝）。

(2) 保护导体的截面积还可用 GB7251.1 中规定的公式计算求得，或用其他方法获得，如通过试验获得。确定保护导体的截面积，必须同时满足下述条件：

表 3.17-11 保护导体的截面积（PE、PEN） mm²

相导线的截面积 S	相应保护导体的最小截面积 S _p （PE、PEN）
S≤16	S
16<S≤35	16
35<S≤400	S/2
400<S≤800	200
800<S	S/4

- 注 1. 在成套设备内 PEN 导体不需绝缘。
2. 结构部件不应用作 PEN 导体，但铜制或铝制安装轨道可用作 PEN 导体。
3. 在某些应用场合，例如大的荧光照明装置，PEN 导体的电流可能达到较高值，可以根据制造商与用户之间的专门协议，配备其载流量等于或高于相导体的 PEN 导体。

1) 进行保护电路的短路强度试验时，故障电路阻抗值应满足保护器件动作时所要求的条件。

2) 电力保护器件动作条件应这样选择：不能因保护导体（PE、PEN）中的故障电流所引起的温升损坏该导体或其电连续性。

3.6 绝缘导线的选择

- (1) 导线的额定电压应高于装置的工作电压。
(2) 辅助电路通常采用多股铜芯绝缘软线。
(3) 导线截面积的选择，应能承受电路中允许的最大长期工作电流。

另外还应考虑能满足与保护电器间的配合，测量表计的带负载能力、机械强度及与接线端子连接等。通常电压回路导线截面积用 1.5mm²，电流回路导线截面积用 2.5mm²，如果连接导线较长，应考虑加粗导线。

4 壳体设计

应符合 GB/T 20641—2006/IEC 62208—2002《低压成套开关设备和控制设备空壳体的一般要求》。

(1) 外形结构。根据设备的技术要求并考虑到检修的方便确定设备外形结构。例如，对防护等级要求较高，可以选择封闭式；对电路性能要求较高，要求电路间隔距离，可选择抽出式或单元隔离式，还要充分考虑保护接地连续性。

(2) 机械强度。柜体应有足够的机械强度保证能承受分断时的电动力、提升以及运输后壳体不变形。

(3) 防护等级。根据使用环境及对安全、可靠性的要求确定防护等级。防护等级高的设备适应于环境恶劣的场所，比较安全可靠，但造价高，由于通风不好，壳内温度高，一般要考虑降容使用。对于单元隔离式装置，各功能单元的降容系数，不仅与功能单元的容量有关，而且与功能单元在本装置中的安装位置有关。

(4) 安装及固定方式。确定设备是随意固定，靠墙、明挂还是嵌入式安装固定，并确定可进行维护的面，是单面还是双面。

(5) 门和面板的材料。例如，是否需要透明材料。

(6) 通风孔的设计和安装。应考虑当熔断器、接触器、断路器在正常工作时或在短路情况下，不能有电弧或已熔金属喷出。当喷弧源距通风孔较近，在两者之间加装隔弧板时，隔弧板的尺寸每边应大于通风孔外形 10mm，隔弧板应为耐弧的绝缘板。通风孔的尺寸、形状及安装位置不应使整个外壳的强度有明显下降，也不应降低外壳的防护等级。外壳顶部的通风孔应用覆板遮盖。

(7) 对耐腐蚀的要求。根据安装使用环境确定。

(8) 壳体外形尺寸。考虑内部所装的元器件、设备的安装位置及本系统的其他壳体尺寸。

外形尺寸的优选值 (mm): 高为 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200; 宽为 400, 600, 800, 1000, 1200, 1600, 1800; 深为 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1600。

5 总装图、布置图设计

(1) 满足元件的使用要求。必须满足元件使用说明书中的要求, 例如: 开关电器的飞弧距离, 否则分断时容易发生短路事故; 满足元件对湿度的使用要求, 当设备装在湿度较高, 温度变化较大的环境中时, 为防止发生凝露, 可在设备内部增设一台小功率的加热器 (额定功率的参考值是每立方米有效壳内体积需要 50~100W 功率)。一般加热器安装在壳体的下半部, 在这种环境中如果设备的防护等级为 IP55 或更高, 还可以考虑在壳体底部安装凝露吸收器。

(2) 元件间功能不能相互影响。元件的安装接线位置, 应保证其功能不因其相互影响 (如电弧、发热、振动等) 而受到损害。

(3) 元器件、部件、母线、线束及设备的结构件之间需要留有足够空间。

1) 保证其电气间隙和爬电距离。

2) 提供元件安装、接线、调整、操作、维修等工作所需要的足够空间。

3) 应易于接近和方便相应的操作。例如, 熔断器熔体的更换, 热继电器的复位、继电器的调整、接线座的连线等应方便。

(4) 屏面元件的布置。屏面元件的布置应便于观察、易于操作, 指示表计的中心高度一般在距地面为 1.7~2m 范围内, 电能计算表计的中心高度一般在距地面为 0.6~0.8m 范围内, 操作器件 (如手柄、按钮等) 的中心高度应在距地面 0.8~1.6m 范围内。

(5) 发热元件与相邻元器件布置。发热元件与相邻元器件之间留出散热距离。额定功率为 75W 及以上的管形电阻应横装, 横装时, 电阻温升均匀, 散热条件较好。

(6) 布局合理。同一电路的元件相对在同一水平线或同一垂直线上集中布置, 有可能时其辅助电路元件最好也能按此布置; 发热元件尽量布置在上部; 重量较大的电器元件应安置在尽可能低的位置上; 母排、导线的布置应尽可能减少涡流的影响。

(7) 合理分配电能。进线单元尽可能布置在本系统设备的中部位置上, 将馈出线单元布置在进线单元的左右两侧, 供给较大负载的馈出线单元应尽可能靠近进线单元等。

6 低压开关设备的热设计

低压开关设备的热设计是一个非常复杂的过程。它包括内装元器件的发热; 母排及连接件的发热; 壳体内热传导和对流; 壳体材料的导热; 壳体内温度平衡状态下的热分布; 壳体外部的传导和对流以及内、外部 (强迫) 通风 (如有) 等。

6.1 壳体内外热转移过程

壳体内外热转移过程指的是壳体外壳的一面是柜内的空气流体, 另一面是柜外的大气流体, 属两面热转移过程。它们都是固体面和流体间的传热, 只不过一个是由流体向固体传热, 另一个是由固体向流体传热, 两者分别由二个导热过

程组成。两者可以看做是互为逆过程, 组合一起称传热过程 (热转移)。一般来说壳体内外的热转移过程是: 壳内电器元件功耗产生的热能, 先在柜内通过空气对流达到热平衡, 并传导到外壳内侧, 再通过外壳内外侧之间的固体导热过程传导到外壳的外侧, 随即通过外壳外面的空气对流进行传热 (散热), 使热能被周围环境空气而吸收。

由于成套开关设备壳体大都是由平板材料, 或者说壳体表面的几何形状大都是由平面组成, 因此讨论壳体内外热转移过程, 若其他过程都不计, 并只计及稳定状态, 可简化为讨论平板的热转移过程。评价热转移、传热计算的基本原理是热力学基本定律。如热力学第一定律——热是能的一种形态, 功可以变成热, 又可以进行相反的变换。

6.1.1 导热

关于平板的导热物理含义, 也就是平板的导热的热力学机理。首先明确规定平板是热传导物质, 才能讨论平板的导热问题。所谓平板导热, 是指平板固体内部, 静止状态的液体或气体内部的热量转移是由传导方式进行。假设平板内部 (板厚为 δ) 的温度分布, 沿板的厚度方向按直线变化, 则在单位时间内的导热热量 Q [通过物体内部所取的面积 A (m^2) 部分, 在时间 dt 内所传递的热量] 为

$$dQ = -kA \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) dt \quad (3.17-1)$$

式中: $\partial t / \partial n$ 为垂直于面积 A 方向上的温度梯度, $^{\circ}C/m$; k 为随物质而不同的比例常数, $kJ/(h \cdot m^2 \cdot ^{\circ}C)$; A 为导热固体物质的表面积, m^2 。

如以平板为例 (平板内部的温度分布), 则有

$$Q = kA \frac{t_n - t_w}{\delta} \quad (3.17-2)$$

式中: k 为导热系数, 依物质而异的比例系数, $kJ/(h \cdot m^2 \cdot ^{\circ}C)$; t_n 、 t_w 为平板两侧的温度, $^{\circ}C$; A 为导热固体物质的表面积, m^2 ; δ 为平板的厚度, m 。

对于平板厚度和导热材料不同的几层平板组成的情况, 设两侧的温度分别为 t_n 、 t_w , 则有

$$Q = A \frac{t_n - t_w}{\sum (\delta_n / k_n)} \quad (3.17-3)$$

这里讨论的假定是一维稳定热传导状态下, 每单位长度上, 该导热物质在单位温度差下产生的热流密度 dQ 定义的。而三维热传导问题, 可设温度为 $t(x, y, z, T)$, 则用傅里叶定义给出在 x 方向上的热流密度分量 $Q(x, y, z, T)$, 即

$$Q_x = -kt/x \quad (3.17-4)$$

由式 (3.17-4) 可知, 在稳定热传导的情况下, 决定温度空间分布的传导物质参量仅为导热系数 k 。

非稳定传导, 从傅里叶热传导偏微分方程可知

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad \alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (3.17-5)$$

决定温度空间分布和时间分布的热传导物质参量是导热系数 k 。其中, ρ 为传导物质的密度 (kg/m^3), c 为其比热容 [$kJ/(kg \cdot ^{\circ}C)$]。假定 k 不是温度的函数, 式 (3.17-5) 给出的解为非稳定热传导的基本公式。常温下导热系数的概值见表 3.17-12。

表 3.17-12 常温下导热系数 k 的概值

气体 (1 个大气压下)	液体	玻璃	冰	金属
0.02 (空气) ~ 0.2 (氢)	0.1 (油) ~ 0.5 (水)	0.6 ~ 2	2	20 (水银) ~ 400 (银)

通常 k 值随温度而变化, 特别是工业用隔热材料、耐火材料与合金。对于成套设备, 为简化计算, 如为一种材料,

则认为是一个常数。

6.1.2 对流放热

当流体（例如空气）与固体壁接触后，由于它们之间有温度差，就会产生热量的转移现象，称为放热。由于流体的温度差造成了流体的密度差，从而引起平板周围的流体（空气）的流动，也称之为自由流动放热。对由外界动力（例如强迫通风）引起的流动（对流），称之为强迫流动放热。由于流动有层流与紊流之分，热量转移的机理也会因这种差别而有所不同。单位时间内通过温度 t_w （℃）、面积 A （m²）的壁面所传递的热量，一般可写出下式

$$t_q = kA(t_n - t_w) \tag{3.17-6}$$

式中： t_n 为离开壁面某位置（例如贴近固体的流体）的温度或平均温度； t_w 为固体温度； k 是由流动状态和流体性质决定的值，称为对流放热系数，kJ/(h·m²·℃)。

6.1.3 传热

热量通过壁面，从一侧流体传到另一侧流体，称为传热。

设两流体的温度分别为 t_n 、 t_w （℃），壁面积为 A （m²），则传热量 Q 可用下式求出

$$q = kA(t_n - t_w) \tag{3.17-7}$$

式中： k 称为传热系数，kJ/(h·m²·℃)。

如果壁两侧介质不同，它们的放热系数不同，分别为 α_1 、 α_2 ，则壁的传热系数 K 为

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{k} + \frac{1}{\alpha_2} \tag{3.17-8}$$

式中： δ 为平板传热的板厚，m； α_1 为侧流体的传热系数，kJ/(h·m²·℃)； α_2 为另一侧流体的传热系数，kJ/(h·m²·℃)； t_n 、 t_w 为平板两侧的温度，℃； k 为从一侧流体到另一流体的传热系数，kJ/(h·m²·℃)。

对不同材料介质的传热系数概值见表 3.17-13。

表 3.17-13 传热系数 k 的概值 kJ/(h·m²·℃)

静止空气	流动空气	流动油	流动水	沸腾水
1~20	10~250	50~1500	250~5000	500~45 000

6.1.4 热辐射

在导热固体的周围空气都是静止的，没有外界动力造成的流动，那么，固体所含的热量的散热过程就是辐射。单位时间内，单位面积上辐射的热量称为辐射率。当辐射能落到其他物体上时，一部分被吸收，一部分被反射，其余部分透过物体。这些能量与辐射到物体上的总能量之比，称为吸收率、反射率、透射率，分别用 α 、 γ 、 t 表示，并有 $\alpha + \gamma + t = 1$ 。对固体来说，一般 $t = 0$ 。投射到的能量全部吸收时 $\alpha = 1$ ， $\gamma = t = 0$ ，这种物体成为绝对黑体。绝对黑体的辐射力用司提芬-玻尔兹曼定律表示为

$$E_b = \sigma T^4 \tag{3.17-9}$$

式中：因数 $\sigma = 2.40 \times 10^9$ kJ/(h·m²·K⁴)。

一般的辐射力用下式表示为

$$F = \epsilon E_b = \epsilon \sigma T^4 \tag{3.17-10}$$

式中： ϵ 为辐射率或称黑度，经常小于 1； T 为热力学温度，K。

6.2 开关柜有效散热面积

开关柜有效散热面积是指开关柜各面周围能够有可能散发热量的面积。

根据 IEC 60890 与 VDE 0660/500，确定不同装配位置、散热状况，找出表面系数 b ，即可求出有效散热面积 A_e 。（见表 3.17-14~表 3.17-16）。

还可根据德国标准及 IEC 890（VDE 0660/5000）提供的图解简化表格，快速计算出已经知道外形尺寸和安装装配位置后的壳体有效散热面积 A_e 。（见表 3.17-17），它的物理含义是：可以做到有效散热的柜体表面。

表 3.17-14 计算方法、用途、公式和特性

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
计 算 公 式			外 壳		特 性					特性曲线
有效散 热表面 A_e	空 气 温 升		有效散 热表面 A_e		系 数		指 数			不同有效热面 积壳体内部的空气 温升分布
	外壳中部	外壳顶部 (内部)			b	k	d	c	x	
$A_e = \Sigma$ ($A_e \times b$) (1)	$\Delta t_{0.5} =$ $k \times d \times P^x$ (2)	$\Delta t_{1.0} =$ $c \times \Delta t_{0.5}$ (3)	$>1.25m^2$	不带通 风口的 外壳	见表 3.17-16	见图 3.17-22	见表 3.17-18	见图 3.17-25	0.804	见图 3.17-28 (a)
				带通风 口的外壳		见图 3.17-23	见表 3.17-18	见图 3.17-27	0.804	
			$\leq 1.25m^2$	不带通 风口的 外壳		见图 3.17-24		见图 3.17-26	0.804	见图 3.17-28 (b)

注 本表中的符号含义见表 3.17-15。

表 3.17-15 符号、单位和名称

符 号	单 位	名 称
A_0	m ²	外壳的外表面
A_b	m ²	外壳的底表面
A_e	m ²	外壳的有效散热表面
b		表面系数
c		温度的分布系数
d		外壳内水平隔板的温升系数
f		高/底系数
h		高/宽系数
g		外壳高度








续表

符 号	单 位	名 称
k		外壳常数
n		内部水平隔板的数量（最多达三个隔板）
p	W	外壳内装设备的有效功率损耗
W	m	外壳宽度
x		指 数
Δt	K	外壳内部的总温升
$\Delta t_{0.5}$	K	外壳中部（内部）的温升
$\Delta t_{0.75}$	K	外壳 3/4 高度处（内部）的温升
$\Delta t_{1.0}$	K	外壳顶部的温升


表 3.17-16 符合安装形式的表面系数 *b*


安 装 形 式	表 面 系 数
裸露的顶部表面	1.4
封闭的顶部表面	0.7
裸露的侧面，例如前面、后面和侧面	0.9
封闭的面，例如墙上安装式外壳的背面	0.5
中间的外壳侧面	0.5
底表面	不考虑
仅为计算而用的假设的隔室侧面不考虑在内	


表 3.17-17 不同安装位置壳体有效散热
面积和壳体外形尺寸的关系

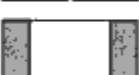
安装位置	有效散热面积 (mm ²)
	$A_e = 1.8H + (B + T) + 1.4BT$
	$A_e = 1.4BT (H + T) + 1.8HT$
	$A_e = 1.4T (H + B) + 1.8HB$
	$A_e = 1.4H + (B + T) + 1.4BT$
	$A_e = 1.8BH + 1.4 \times BT + TH$
	$A_e = 1.4B (H + T) + TH$
	$A_e = 1.4BH + 0.7BT + TH$


注 安装位置图形含义：


- 

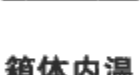
所有面都可散热的单独壳体；
- 

靠墙安装单独壳体；
- 

分离形式的第一个或最后一个壳体；
- 

并排靠墙安装第一个或最后一个壳体；
- 

分离形式的中间外壳；
- 

并排靠墙安装的中间壳体；
- 

顶部封闭，靠墙并排安装的中间壳体。

6.3 箱体内温度梯度分布

6.3.1 箱体内中部空气温升 $\Delta t_{0.5}$

箱体内中部空气温升根据试验大约是一指数曲线，记为 P^x ，不同壳体材料、外形尺寸，只是曲线的走向不同，既指数曲线的指数值 x 不同。

有效热面积 $A_e \leq 1.25\text{m}^2$ （或有效热面积 $A_e > 1.25\text{m}^2$ ）箱体内中部空气温升曲线，可通过计算求出箱体高度一半处的温升 $\Delta t_{0.5}$ 为

$$\Delta t_{0.5} = kdP^x \tag{3.17-11}$$

式中： k 为箱体常数； d 为带隔板时温升系数； P 为功耗，W； x 为空气温升(功耗)曲线的指数； P^x 为功耗计算值，W。

当隔板数位为 0 时 $d=1$ ；其他隔板数时的系数 d 值由表 3.1.7-18 查出。

表 3.17-18 有效面积 $A_e > 1.25\text{m}^2$ 的外壳系数 *d*

不带通风口	水平隔板的数量	0	1	2	3
	<i>d</i>	1.00	1.05	1.15	1.30
带通风口	水平隔板的数量	0	1	2	3
	<i>d</i>	1.00	1.05	1.10	1.15

k 为箱体外壳常数（分别见图 3.17-22~图 3.17-24）依据有效热面积 A_e （ 1.25m^2 ）及是否带通风，从曲线中查出。

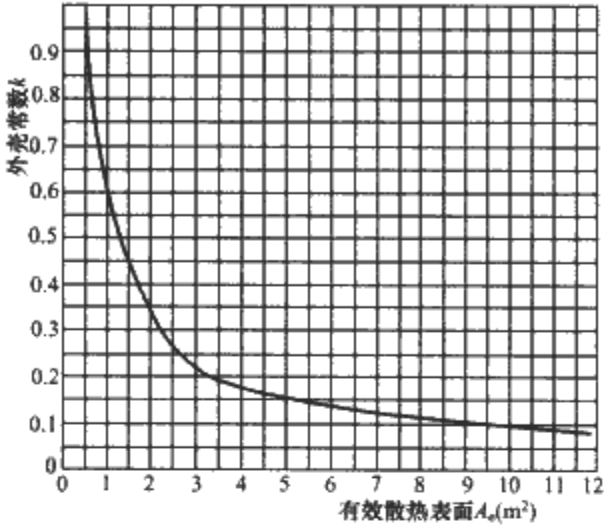


图 3.17-22 不带通风口，有效散热面积 $A_e > 1.25\text{m}^2$ 的外壳常数 *k*

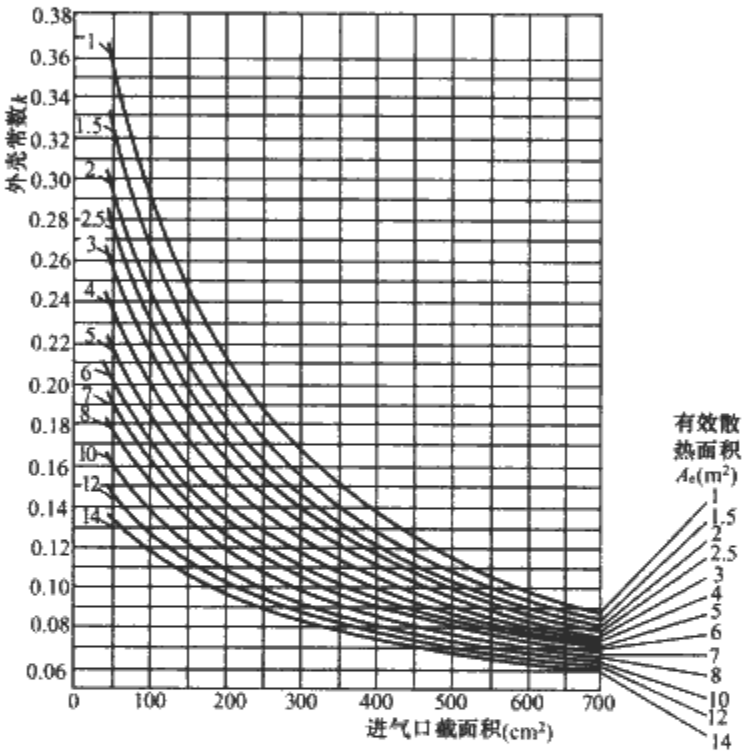


图 3.17-23 带通风口，有效散热面积 $A_e > 1.25\text{m}^2$ 的外壳的常数 *k*（出气口的截面积是进气口截面积的 1.1 倍）

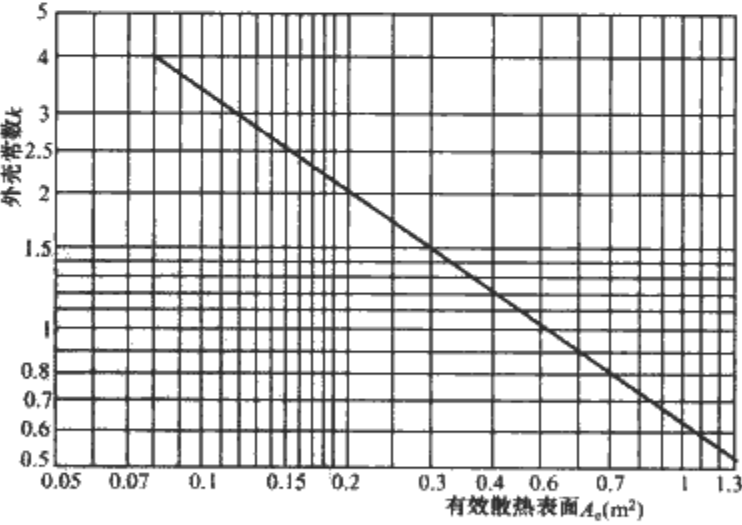


图 3.17-24 不带通风口，有效散热面积 $A_e \leq 1.25\text{m}^2$ 的外壳常数 *k*

空气温升(功耗)曲线的指数 x （见表 3.17-14），依据有效散热面积及是否带通风与面积大小，从表中查出。最后将求出结果带入式（3.17-11）得

$$\Delta t_{0.5} = kdP^x$$

从中求出 $\Delta t_{0.5}$ 。

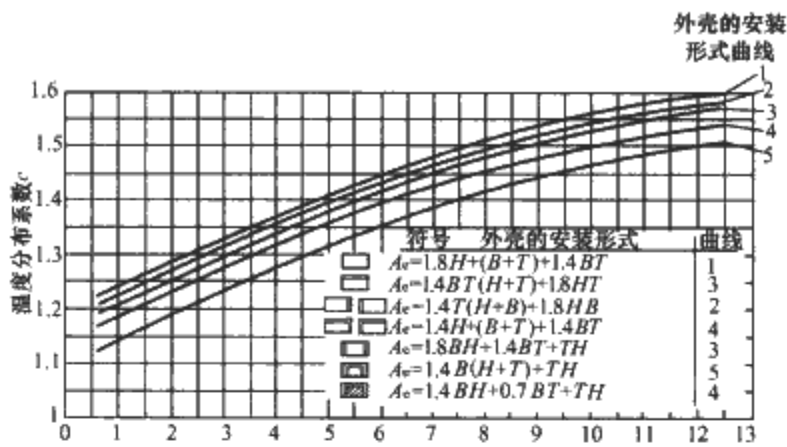


图 3.17-25 不带通风口，有效散热面积 $A_e > 1.25\text{m}^2$ 的外壳的温度分布系数 c

6.3.2 箱体顶部的空气温升 $\Delta t_{1.0}$

箱体顶部的空气温升 $\Delta t_{1.0}$ 为

$$\Delta t_{1.0} = c \Delta t_{0.5} \tag{3.17-12}$$

式中： c 系数考虑了外壳内部温度的扩散，其定义根据下述装置的设计安装而定，取决于安装形式和高/底系数 f 或高/宽系数 g 。

- (1) 对于不带通风口的外壳，有效散热面积 $A_e > 1.25\text{m}^2$ ，系数 c 取决于安装形式和高/底系数 f ， $f = \frac{h^{1.35}}{Ab}$ 。
- (2) 对于带通风口的外壳，有效散热面积 $A_e > 1.25\text{m}^2$ ，系数 c 取决于安装形式和高/底系数 f ， $f = \frac{h^{1.35}}{Ab}$ 。
- (3) 对于不带通风口的外壳，有效散热面积为 $A_e \leq 1.25\text{m}^2$ ， c 系数取决于高/宽系数， $g = \frac{h}{W}$ 。

这里， h 为外壳的高度， m ； Ab 为外壳底部的表面积， m^2 ； W 为外壳的宽度， m 。

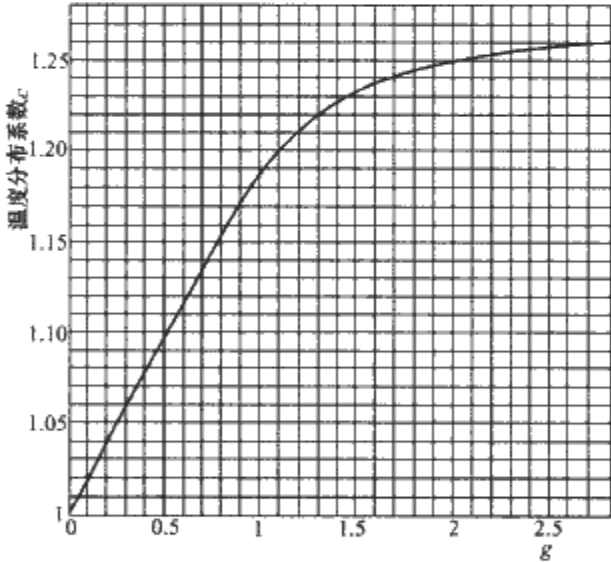


图 3.17-26 不带通风口，有效散热面积 $A_e \leq 1.25\text{m}^2$ 的外壳分布系数 c

6.4 不同有效热面积壳体内的空气温升分布

- (1) $A_e \leq 1.25\text{m}^2$ 的壳体大约在高度的 $3/4$ 处与柜顶的温度是一样的，缘于柜体狭窄，上、下对流不畅，为此在柜内元件布置时从散热角度，要留有对流通道。
- (2) 对于 $A_e > 1.25\text{m}^2$ 的壳体大约在高度的 $3/4$ 处与柜顶的温度有较明显差异。
- (3) 有效散热面积愈大从柜底到柜顶温度变化愈趋缓，而柜的底部温升接近零。

6.5 带柜内外空气交换的柜体的热设计

在这里所谓带柜内外空气交换（简称通风）的柜体是除

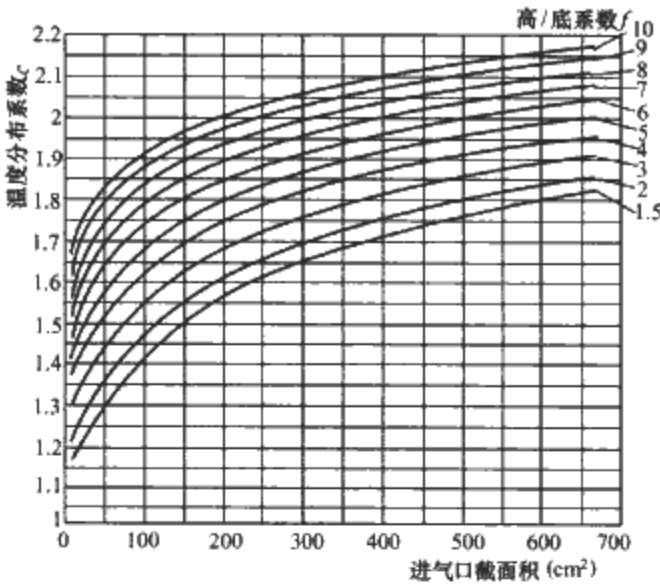


图 3.17-27 带通风口，有效散热面积 $A_e > 1.25\text{m}^2$ 的外壳温度分布系数 c （出气口的截面积是进气口截面积的 1.1 倍）

去全封闭的柜体以外的所有柜体，包括自然通风的柜体在内。

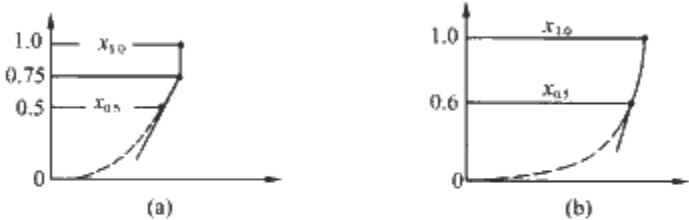


图 3.17-28 不同有效热面壳体内的空气分布
(a) $A_e \leq 1.25\text{m}^2$ ；(b) $A_e > 1.25\text{m}^2$

6.5.1 设计的基础

带通风的几种柜体内、外空气交换的柜体类型，见表 3.17-19。

计算时的基本参数

- (1) P_V 为柜内电气装置的功耗， W 。
- (2) t_w 为周围的空气温度， $^{\circ}\text{C}$ 。
- (3) t_n 为柜内空气温度， $^{\circ}\text{C}$ 。
- (4) $\Delta t = t_n - t_w$ 温升， K 。
- (5) IP 为柜体的防护等级。

6.5.2 几种类型的柜体热设计

几种柜体的类型的图示及有关说明见表 3.17-19。具体的热设计下面分别叙述，设柜体尺寸高 2000mm 、宽 800mm 、厚 800mm ，如图 3.17-29 所示，为靠墙安装。它的有效散热面积依据表 3.17-17 得出为 5.38m^2 。

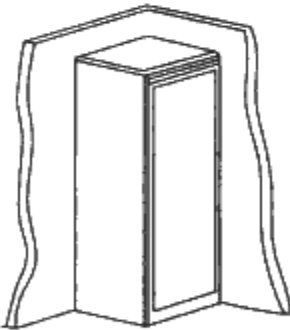


图 3.17-29 靠墙安装柜体示例

6.5.2.1 自然对流的柜体热设计

自然对流的柜体就是通过柜表面进行的热交换（见表 3.17-19）。它的有效散热面积 A_e 计算见表 3.17-17。

6.5.2.2 通过强迫通风的柜体热设计

通过强迫通风的柜体的示意图见表 3.17-19。

(1) 功耗公式计算为

$$P_0 = kA(t_n - t_w) \tag{3.17-13}$$

式中： P_0 通过柜表面的热功耗（热交换）， W ； k 热交换系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ； A 有效散热结构面积， m^2 ； t_n 柜内温度， $^{\circ}\text{C}$ ； t_w 柜外温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $P_0 > 0$ 热损耗， $P_0 < 0$ 热吸收。

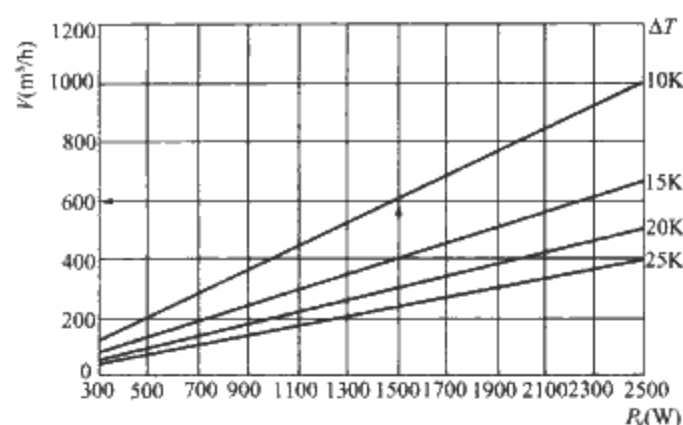


图 3.17-31 通过风扇的直接热交换的柜体通风量 V 计算图

(1) 热交换时需要的冷却容量 Q_k 的公式

$$Q_k = P_v - P_0 \quad (3.17-15)$$

式中： Q_k 为热交换时需要的冷却容量，W； P_v 为柜功耗，W； P_0 为功耗，W。

再设 $P_v = 1300\text{W}$ 、 $P_0 = 538\text{W}$ ，则有 $Q_k = (1300 - 538)\text{W} = 762\text{W}$ 。

(2) 用查表法找出 Q_k 。用查表法找出 V ，需先看图 3.17-32。设 $t_n = 40^\circ\text{C}$ 、 $t_w = 20^\circ\text{C}$ ($t_n > t_w$) 时，查得数据 $Q_k = 1200\text{W}$ 。

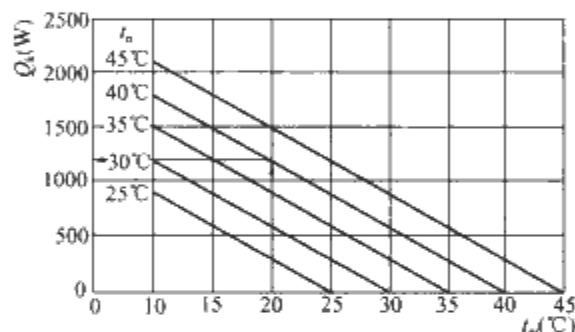


图 3.17-32 通过多路冷空气进入（多个横向风道）的热交换柜体热交换量 Q_k 计算图

6.5.2.5 有冷却剂制冷单元的柜体热设计

(1) 有冷却剂的制冷单元柜体的冷却剂容量 Q_k 计算公式为

$$Q_k = P_v - P_0 \quad (3.17-16)$$

式中： Q_k 为制冷单元需要的冷却容量，W； P_v 为柜功耗，W； P_0 为功耗，W。

因为这时存在着 $t_n \geq t_w$ 和(或) $t_n < t_w$ 情况，功率交换可能出现负值，即当 $t_n < t_w$ 时柜内不是向外散发热量，而是吸收外部热量。设 $k = 5\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ， $A = 5.38\text{m}^2$ ， $t_n = 30^\circ\text{C}$ ， $t_w = 35^\circ\text{C}$ ，则 $P_0 = kA(t_n - t_w) = -134.5\text{W}$ ，并有 $Q_k = P_v - P_0 = [500 - (-134.5)]\text{W} = 634.5\text{W}$ 。

(2) 用图表查法找冷却剂容量 Q_k 。用查表法找出 Q_k ，需先看图 3.17-33，然后将数据 $t_n = 30^\circ\text{C}$ 和 $t_w = 35^\circ\text{C}$ ($t_n > t_w$) 代入，即可得出 $Q_k = -800\text{W}$ 。

6.5.2.6 空气—水热交换的柜体热设计

空气—水热交换是指加装有空气与水的交换器，将空气带的热能转化为存于水的热能，这种交换效果很高可使柜体达到较高的密封等级。

(1) 需要的冷却量 Q_k 计算公式为

$$Q_k = P_v - P_0 \quad (3.17-17)$$

式中： Q_k 为需要的冷却容量，W； P_v 为柜功耗，W； P_0 为功耗，W。

设 $k = 5\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、 $A = 5.38\text{m}^2$ 、 $P_v = 1000\text{W}$ 、 $t_n = 30^\circ\text{C}$ 、 $t_w = 35^\circ\text{C}$ ，则 $P_0 = kA(t_n - t_w) = -134.5\text{W}$ ，并有

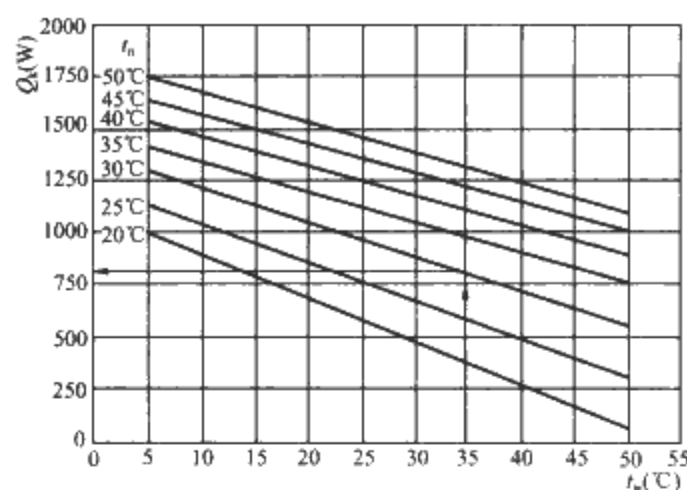


图 3.17-33 有冷却剂的制冷单元的柜体的冷却剂容量 Q_k 计算图

$Q_k = P_v - P_0 = [1000 - (-134.5)]\text{W} = 1134.5\text{W}$ 。

(2) 用图表查法找冷却剂容量 Q_k 。用查表法找出 Q_k ，需先看图 3.17-34，然后将数据 $t_n = 30^\circ\text{C}$ 和 $t_w = 35^\circ\text{C}$ 、水温 $T_w = 15^\circ\text{C}$ 引入图 3.17-34 中，即可得出制冷剂的冷却量 $Q_k = 1500\text{W}$ 。

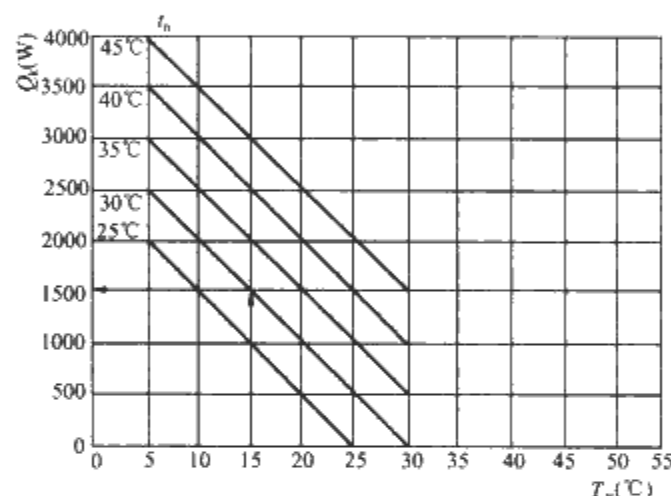


图 3.17-34 有空气与水交换器的制冷单元的柜体的冷却剂容量 Q_k 计算图

6.6 空壳体的热耗散能力

6.6.1 空壳体热功耗的计算式

空壳体热功耗的计算式可根据公式计算。

(1) 计算依据。将式 (3.17-11) 和式 (3.17-12) 重复列于下

$$\Delta t_{0.5} = kdP_v$$

$$\Delta t_{1.0} = c\Delta t_{0.5}$$

并认为

$$\Delta t_{0.75} = (\Delta t_{1.0} + \Delta t_{0.5}) / 2$$

(2) 求柜内总发热功率 P_v 。将上面诸式再经重组得出

$$P_v = \sqrt{\frac{2\Delta t_{0.75}}{(1+c)kd}} \quad (3.17-18)$$

(3) 求柜内总耗散热能力 Q_v ：在热平衡情况下，可近似认为柜体的热耗散能力 Q_v （即壳体内产生的热量全部为壳体外壳散出）为

$$Q_v = P_v$$

则有

$$Q_v = \sqrt{\frac{2\Delta t_{0.75}}{(1+c)kd}} \quad (3.17-19)$$

6.6.2 壳体的热耗散能力

各种不同尺寸和不同安装位置时的壳体的热耗散能力将依据断路器负载系数，确定安装位置，带入数据，即可得出

不同尺寸和不同安装位置时的壳体的热耗散能力。此外 IEC17D 委员会 2002 年发布 IEC 62208《低压开关设备空壳体》“技术要求”中列出市场销售的壳体必须向用户提供不同固定尺寸、壳体的热量耗散能力（即能散出多少热）。

6.7 开关设备和控制设备的热设计

当前，对低压开关成套设备提出了高防护的要求，这种产品属于密封柜。为了保证工作可靠性，开关设备制造时需考虑内装电气元器件的热量散发、通过柜体（有足够散热能力）散出。下面为热设计的实例，仅供参考。

6.7.1 设计目的

本设计是根据开关柜的外形尺寸及内装电气元器件的热功耗及安装位置，确定满足产品温升要求条件下能否正常工作。

6.7.2 设计依据

设计的依据是国际电工委员会（IEC）报告 890《用外推法检查低压开关设备和控制设备通过部分型式试验成套设备（PTTA）的温升》。

设计时需提供：

- （1）外壳的尺寸：高、宽、深。
- （2）按 IEC 890 指定的安装形式之一。
- （3）外壳的设计，例如带或不带通风口。
- （4）内部水平隔板数量。

（5）外壳内设备的有效功率损耗。安装在部分型式试验成套设备电路上的设备的有效功率损耗是制造厂家给定的不同电路上额定电流的功率损耗；导体的有效功率损耗是依据 IEC 890 修订 1 的表 B。

6.7.3 计算程序

6.7.3.1 开关柜内装电气元器件的发热功率

开关柜内装电气元器件的发热功率是开关柜热设计的基础。只有正确了解元器件的发热功率及其与工作环境温度的关系，才能进行系列设计、计算。一般开关柜内装电气元器件的发热功率是由元器件制造厂提供。下面列出不同元器件的不同电流容量额定发热功率的典型值（见表 3.17-20）。

表 3.17-20 元器件功耗表

变压器容量（kVA）	160	250	400	630
开关柜额定电流（A）	230	360	578	1000
断路器额定电流（A）	250	400	800	1250
额定电流时功耗（W）	45	107	160	210
断路器负载系数	0.92	0.9	0.72	0.73
断路器实际工作功耗（W）	38	86.6	82.9	134.4
连接母线功耗（W）	10.6	25.9	24.8	40.32
互感器功耗（W）	3×3	3×3	3×3	3×3
电气元器件总功耗（W）	57.6	121.5	116.7	183.7

注 本表列出的是典型值，仅供参考，计算时，要依据选用器件的实际功耗。

下面以配电柜容量 630kVA 为例说明计算过程。

（1）断路器功耗（NW3125，C 系列 N 框架 800/1250A）为 210W。

（2）断路器实际工作电流为 1000A。

（3）断路器实际功耗可按式求出：

- 1) 断路器负载系数为
$$1000/1250=0.8 \quad (3.17-20)$$

2) 断路器实际功耗为

$$P_C=[210\times(0.8)^2]W=134.4W。(3.17-21)$$

（4）母线功耗可参考 IEC 890 或通过计算得出，也可依据下式估算出

$$P_m=P_C\times30\% \quad (3.17-22)$$

$$P_m=134.4\times30\%=40.32W$$

6.7.3.2 外壳有效散热面积

根据表 3.17-14 和表 3.17-16，确定不同装配位置及散热状况，找出表面系数 b ，即可求出有效散热面积 A_e 。可根据 IEC 890（或 VDE 0660/500）提供的图解简化表格，快速计算出已经知道外形尺寸、安装类别及壳体的有效散热面积 A_e （见表 3.17-17）。

6.7.3.3 壳体内温度梯度分布

利用表格时应注意，本实例壳体属于 $A_e<1.25mm^2$ 。

6.7.4 计算实例与验证

现举选用塑料外壳箱组式配电柜 MI 产品外壳为例说明设计计算。在 MI 产品样本中 11 号受电方案，电流等级 1000A，选用元件为 NW3125，C 系列 N 框架 800/1250A 塑壳断路器。箱体选用 MI60800+2×MIZR68（即 600mm×600mm 加两个中间框）。

6.7.4.1 元器件功耗

（1）按式（3.17-21）得其相应功耗为

$$P_{1000}=[(1000/1250)^2\times P_{1250}]W=134.4W \quad (3.17-23)$$

由表 3.17-20 查得 P_{1250} 断路器的功耗是 210W。

（2）按式（3.17-22）得

1) 母线功耗 = $[P_{1000}\times30\%=134.4\times0.30]W=40.32W$ 。

2) 三只互感器的功耗为 $3\times3=9W$ 。

3) 三者相加得元器件总功耗 P_Σ 为

$$P_\Sigma=(P_{1000}+40.32+9)W=183.7W(3.17-24)$$

6.7.4.2 有效散热面积 A_e

（1）已知壳体的外形尺寸：宽 $B=0.6m$ ，厚 $T=0.36m$ ，高 $H=0.6m$ 。

（2）计算有效散热面积 A_e 。已知：箱组式柜属于中间外壳，靠墙安装，按表 3.17-17 则有

$$A_e=1.4B(H+T)+TH \quad (3.17-25)$$

$$A_e=1.023mm^2$$

6.7.4.3 确定箱体温升特性曲线及其相应功耗

（1）特性曲线指数。其指数可由表 3.17-14 查得：当 $A_e\leq1.25mm^2$ ，且不带通风壳体时，特性曲线指数 χ 为 0.804。

（2）功耗计算值。则由式（3.17-23）功耗计算值得

$$P_x=[(183.7)^{0.804}]W=66.12W(3.17-26)$$

6.7.4.4 确定箱体内中部的温升

确定箱体内中部的温升，是根据式（3.17-26）计算出。由此需根据表 3.17-14，当 $A_e\leq1.25mm^2$ ，且不带通风壳体时按图 3.17-24，最后根据式（3.17-11），在 $A_e=1.023mm^2$ ， k 为箱体常数 0.63。其中，当隔板数为 0 时 $d=1$ ，其他隔板数时的系数 d 值由表 3.17-18 查出，因本例无隔板，故 $d=1$ 。

$$\Delta t_{0.5}=kdP_x=[0.63\times1\times(183.7)^{0.804}]K=41.6K$$

6.7.4.5 箱体顶部的空气温升 $\Delta t_{1.0}$

箱体顶部的空气温升 $\Delta t_{1.0}$ 按式（3.17-13）计算，式中的常数 c 由图 3.17-26，求出 $c=1.19$ 。则有

$$\Delta t_{1.0}=c\Delta t_{0.5}=(1.19\times41.6)K=49.5K$$

6.7.4.6 温升验算

设元件设置点（相当于柜高的一半）处的空气温度 25°C ，已知壳体内部的温升 41.6K （取柜体温升 $\Delta t_{0.5}$ ）时的柜内温度 $25^{\circ}\text{C} + 41.6\text{K} = 66.6^{\circ}\text{C}$ 。

若元件工作在额定电流时，其周围温度为 40°C ，此时对元件来说附加温升为 $66.6 - 40 = 26.6\text{K}$ 。再根据此温升去看元件需要把工作电流降到多少合适（即降容系数为多少）。查元件厂给出的附加温升与工作电流的关系，即可找到所需的降容系数为 0.75。

$$P = [(1250 \times 0.75 / 1250)^2 \times 210 \times 1.3] \text{ W} = 153.6\text{W}.$$

$$P_x = [(153.6)^{0.804}] \text{ W} = 57.25\text{W}$$

$$\Delta t_{0.5} = kdP_x = [0.63 \times 1 \times (153.6)^{0.804}] \text{ W} = 36.1\text{K}$$

这样，实际元件周围空气温度为 $36.1\text{K} + 25 = 61.1^{\circ}\text{C}$ 。

6.7.4.7 结论

断路器允许的工作温度为 65°C 与实际测得的实际元件周围空气温度 61.1°C 相比，没有超过，能正常工作。

$$\Delta t_{1.0} = c\Delta t_{0.5} = (1.19 \times 61.1) \text{ K} = 72.1\text{K}$$

实际试验测得的箱体最高点的温升为 71.5K ，比计算的要低，满足要求。

第 18 章 低压成套设备的生产设备及加工工艺

1 简述

低压成套设备加工装备与加工工艺是低压成套开关设备和控制设备技术的重要组成部分。它是制造完成低压成套设备所有的电器和机械的连接，用结构部件完整地组装在一起的一种组合体的一个过程。加工装备是保证质量，提高生产效率的有效手段。加工工艺是完成产品组装、最终交付用户，运行满意的有效工作程序。二者相辅相成，构成了完整的质量保证能力。由于各工厂的设备、设施、人力资源不完全相同，工艺水平差异很大，本文工艺要求仅供参考。

1.1 低压成套设备的主要制造工序

低压成套设备的主要制造工序如图 3.18-1 所示。

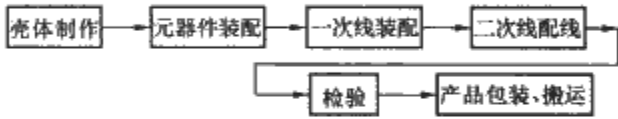


图 3.18-1 低压成套设备的制造工序流程图

1.2 生产加工设备

1.2.1 壳体生产设备

包括平整机、剪板机、折弯机、冲压机、液压机、金属焊接设备、钨极氩弧焊机、交直流氩弧焊机、螺柱焊机、注塑机、压铸机，其中数控冲剪板材柔性加工线是先进、功能齐全的大型设备，也是壳体生产设备具有代表性设备。壳体加工的主要设备如图 3.18-2 所示。

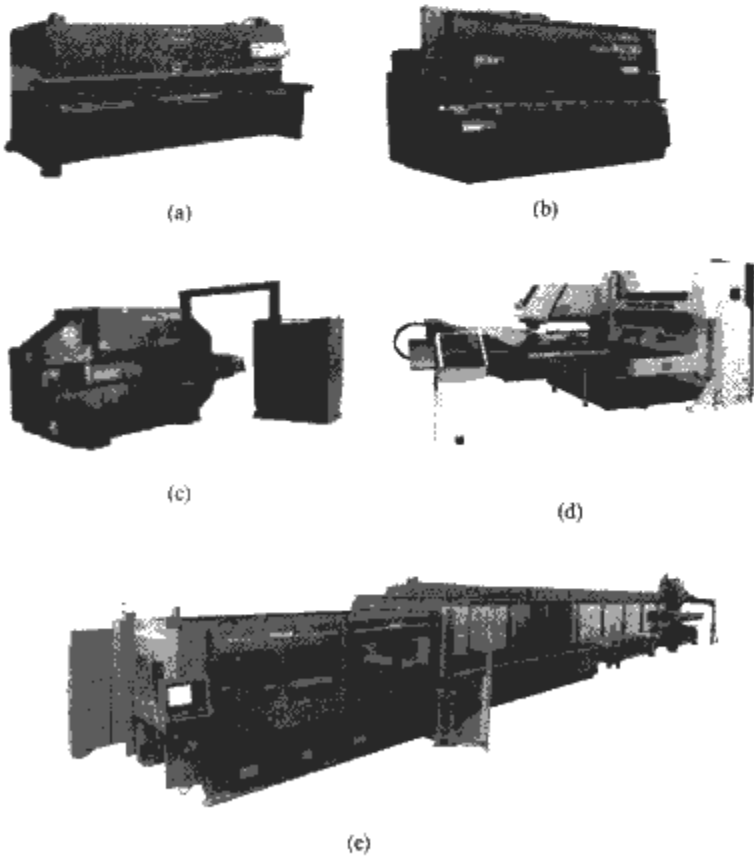


图 3.18-2 壳体加工的主要设备

(a) 数控剪板机；(b) 数控折弯机；(c) 数控多工位冲压机；
(d) 数控板材柔性加工生产线 (e) 板材激光切割柔性生产线

1.2.2 表面处理设备

喷漆装置、喷塑装置、烘箱、气泵等设备，较先进的为自动化静电粉末涂装生产线如图 3.18-3 所示。

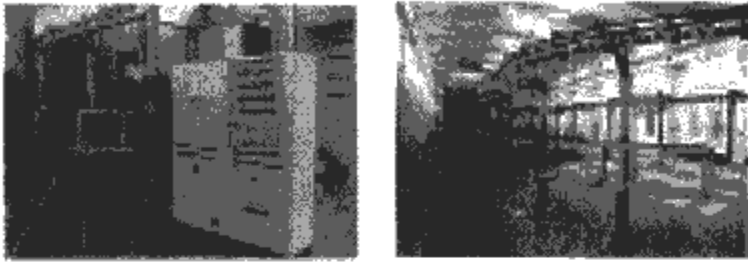


图 3.18-3 自动化静电粉末涂装生产线

1.2.3 母排加工设备

母排加工机、台钳、钻床、电锯、端头冷压线钳、涮锡锅等，较先进的为母排加工柔性生产线如图 3.18-4 所示。



图 3.18-4 母排加工柔性生产线

1.2.4 标志印制设备

电脑套管印号机、电脑标签打印机，如图 3.18-5 所示。

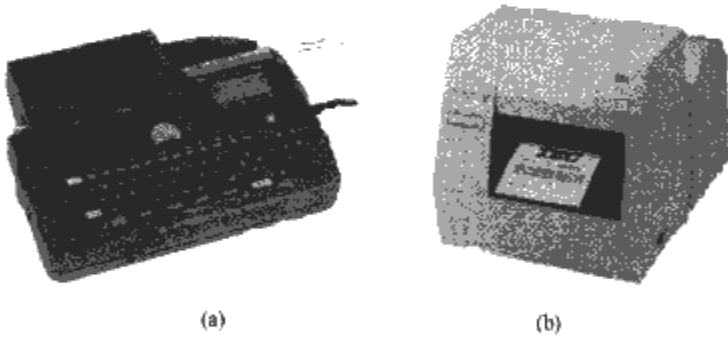


图 3.18-5 标识打印机

(a) 套管线号印字机；(b) 项目代号、铭牌打印机

1.2.5 其他安装及装配的小型工具

电焊机、钻床、榔头、盒尺、钢板尺、扭力扳手、刻丝钳、尖嘴钳、偏口钳、剥线钳、螺钉旋具、电工刀等。

1.3 工艺文件的内容

工厂应对关键生产工序进行识别，关键工序操作人员应具备相应的能力，如果该工序没有文件规定就不能保证产品质量时，则应制订相应的工艺作业指导书，使生产过程受控。

工艺文件应对生产工艺及生产过程检验作出规定，生产过程检验卡也可以与工序流程卡合一，其示例见表 3.18-1。凡图纸未注明的要求均按工艺文件执行。

工艺文件应包括：

(1) 适用范围。

(2) 依据。①产品图样及有关技术文件；②产品生产大纲；③产品的生产性质和生产类型；④本企业现有生产条

件；⑤国内外同类产品的工艺技术情报；⑥企业有关技术领导对该产品工艺工作的要求及有关科室和车间的意见；⑦有关政策。

- (3) 使用的设备、工具、量具。
- (4) 主要材料。
- (5) 工艺方案步骤、方法、要求。
- (6) 检验要求。

(7) 安全要求（剪板机、冲床、折弯机、电焊机等操作必须做人身和设备安全规定）。

表 3.18-1 工 序 流 程 卡 编号：JL-12				
产品名称		型号规格		
工 序	操作者	检验结果	检验员	检验日期
外壳检验				
元器件、材料验收				
元器件装配				
一次线装配				
二次线装配				
一致性检查				
出厂检验				
备 注				

2 壳体加工工艺

若壳体为外加工则应就壳体加工提出要求。壳体加工应符合相关标准的要求，公差依据 JB/T6753.1~5—1993《电工设备的设备构体公差 板金件和结构件的一般公差及其选用规则》和 JB4129—1985《冲压件毛刺高度》，对静负荷、提升、耐机械冲击、异常发热、保护电路连续性、老化腐蚀等要求应符合 GB/T 20641—2006/IEC 62208—2002《低压成套开关设备和控制设备空壳体的一般要求》以及产品标准的要求。

2.1 钢板下料工艺

公差依据 JB/T 6753.1—1993《电工设备的设备构体公差 板金件和结构件的一般公差及其选用规则》，JB/T 6753.2—1993《电工设备的设备构体公差 金属剪切件的一般公差》控制，其中剪切宽度、长度、直线度和剪切垂直度的一般公差，分为 A、B 两级。根据不同要求，可分别选用或混合选用。设备、工具及量具有剪板机、扳手、盒尺、钢板尺等。

2.2 冲压工艺

公差依据 JB/T 6753.3—1993《电工设备的设备构体公差 金属冷冲压件的一般公差》控制，适用于配电柜结构冲孔、落料、抹角。设备有冲床，应根据工件的冲裁力来选择不同吨位的冲床，使用的模具需经检验合格后方可使用。

2.3 折弯工艺

允许公差值按 JB/T 6753.1 中的规定，适用于产品结构零部件折弯加工工序。主要设备、工具与量具有折弯机、盒尺、卡尺、角尺、榔头等。

2.4 结构焊接工艺

- (1) 依据 JB/T6753.4—1993《电工设备的设备构体公

差 焊接结构的一般公差》。

(2) 适用于产品结构焊接工序。主要设备、材料、工具及量具有交流弧焊机、电焊条、点焊机、电焊钳、榔头、木榔头、扁铲、电焊防护帽、盒尺、角尺、钢板尺等。电焊条及焊接电流的选择示例见表 3.18-2 的规定。

表 3.18-2 焊条及焊接电流的选择示例		
焊接厚度 (mm)	焊条直径 (mm)	焊条电流 (A)
2	2~2.5	40~70
3	2.5~3.2	70~110
4	3.2~4	110~160
5	4	160~200
6	≥4	200~250

外形尺寸的允许偏差示例见表 3.18-3（相当于 JB/T 6753.4，4.1 条中表 1 的 A 级）。

表 3.18-3 外形尺寸的允许偏差示例			
尺寸范围 (mm)	偏 差 值 (mm)		
	高	宽	深
>120~400	±1.2	0 -1.0	±1.2
>400~1000	±2.0	0 -1.6	±2.0
>1000~2000	±3.0	0 -2.4	±3.0
>2000~4000	±4.0	0 -4.0	±4.0

垂直度的允许偏差按 JB/T 6753.1 的表 2 垂直度的一般公差 B 或 C 级。

结构外表的结构要素之间（如门与门、门与其他结构要素之间）形成的同一间隙或平行间隙（指间隙尺寸相同的平行间隙）应均匀。其间隙差不得超过表 3.18-4（符合 JB/T6753.4 的表 2）的规定。

表 3.18-4 间 隙 差		
尺寸范围 (mm)	部 位	
	同一间隙均匀差 (mm)	平行间隙均匀差 (mm)
≤1000	1.0	2.0
>1000	1.5	2.5

面板、侧板、门板等板类构件平面度的一般公差。为任意 1m² 小于 3mm。面板通常小于 1.5mm。接地装置周围应满焊，不应伤及联接螺纹。

2.5 组装结构工艺

依据 JB/T 6753.5—1989《电工设备的构件公差组装结构的一般公差》，适用于由若干个金属零部件用铆钉组装或螺钉组装而成的柜体结构，不适用于开关柜内部各功能部件的装配。

主要设备、工具有胎具、铺有橡胶垫的铁平台或装配台、铆钉机、气动扳手或电动扳手、扭力扳手、活扳手、4lb 手锤、6lb 木槌、螺钉旋具(150~250mm)、钢尺(0~500mm，0~1000mm)、钢卷尺(0~2m)、数显卡卷尺(0~2m，0~3m，误差±0.1)、铅垂(包括 0.3~0.5mm 尼龙线)等。

紧固件：当柜体(或分步组装时柜体部件)内各零部件均已装配到位，并调整到规定尺寸后，可以逐个拧紧(有时考虑

到柜体的变形需要选择先后顺序)紧固件螺钉(或铆钉)。

所有紧固件应有防松措施,当螺母拧紧后应高出螺栓 2~5扣。

柜体上的所有紧固件必须有防锈层。

接地(保护电路连续性措施):①接地点及金属壳体设备结构的连接处有绝缘物时,应采用接地垫圈、自攻螺丝连接(或其他措施),手动操作器件接地应采用接地线直接接地;②装有电器的门通过金属铰链与壳体进行组装时,应将门与骨架(或壳体)之间用铜编织线连接,接地线两端应冷压裸电缆端头,接地端子上应装有接地符号。

对门的要求:

- (1) 门装好后应转动灵活、无变形,门的开启角度不得小于 90°。
- (2) 有联锁功能的门,联锁功能应符合图样的规定。
- (3) 装有密封嵌条的门在开启、关闭或受振动时嵌条应不易脱落,门锁打开后,门不得自动弹开。
- (4) 门与门、门与其他结构要素之间的间隙均匀度的允许偏差不超过表 3.18-4 的规定。

防护等级:柜体全部安好后(包括门、面板、盖板、封板、底板、侧板、内部各隔室等),外壳及内部各隔室的防护等级应符合图样及技术条件的规定。

柜体外形尺寸:

- (1) 壳体的外形尺寸高度、深度、宽度及垂直度的一般公差见 JB/T6753.5 的表 1 及表 2。
- (2) 测量方法:
 - 1) 高度测量四角。
 - 2) 深度测量左、右两面,上、中、下三处。
 - 3) 宽度测量前、后两面,上、中、下三处。
 - 4) 偏差尺寸按各部分最大计算。
- (3) 侧板、门板等板类构件平面度的一般公差,为任意 1m² 小于 3mm。面板一般为任意 1m² 小于 1.5mm。

吊环(或吊攀)是整个开关柜承重部件,应严格按照图样要求选择吊环(或吊攀),不得任意代用,安装好后必须拧紧所有螺钉(或螺母)。

柜体底部安装孔和拼柜孔的位置应符合图样要求(不能因柜内安装电器或支持件而影响用户的安装)。

2.6 静电粉末涂漆工艺

主要设备有喷塑装置、烘箱、气泵等。内在质量、质量检查:所用仪器及量具应符合计量要求,并在有效检定周期内,检查项目见表 3.18-5。

表 3.18-5 涂层表面检查

序号	测试项目	检验方法	标准规定	测量仪器	检验时机
1	涂层厚度	按 GB1764 的规定,用磁性测厚仪测 5 点以上,取其平均值	40~60μm	涂层磁性测厚仪	每天
2	涂层硬度	按 GB/T 6739—1996 的规定检测	≥6H	铅笔划痕	每天
3	涂层附着力	按 GB 9286/ISO2409 的规定进行检验	≥1 级	涂层冲击器划格器	每天
4	涂层耐腐蚀性	按 GB/T1771 的规定进行检验	≥1000h	盐雾试验机	必要时

涂装工艺生产流程如图 3.18-6 所示。

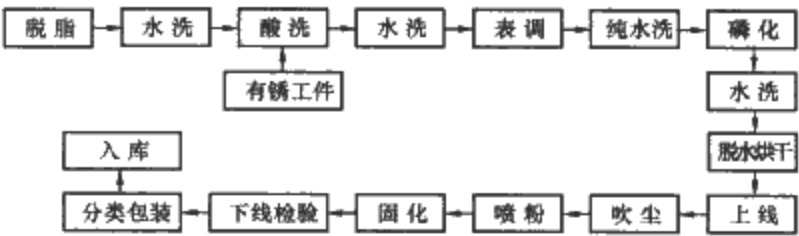


图 3.18-6 涂装工艺生产流程示意图

3 电器元件装配工艺

3.1 依据和适用范围

依据 GB 7251.1—2005《低压成套开关设备和控制设备 第一部分:型式试验和部分型式试验成套设备》编制,适用于低压成套开关设备和控制设备的成品组装制作。

产品组装除应遵守工艺要求外,还应满足用户的要求。

3.2 设备及工具

盒尺、扳手、螺钉旋具等。

3.3 准备工作

- (1) 装配前应先看明图样及技术要求,检查元器件型号、规格、数量等与图样是否相符,列入国家强制性认证目录的电器应验证其 CCC 标志,发现问题及时处理。
- (2) 检查元器件有无损坏,发现问题及时更换。
- (3) 组装前必须擦净元器件上的灰尘及油污。

3.4 装配工艺及要求

- (1) 安装的元件应操作方便,操作时不受到空间的妨碍,不能触及到带电体。
- (2) 维修容易,能够较方便地更换元器件及维修装置的其他部位。
- (3) 满足电器元件产品说明书的要求,例如满足飞弧距离、电气间隙和爬电距离的要求。
- (4) 保证一、二次线的制作、安装距离。
- (5) 同一批次相同产品的装配应一致。
- (6) 先将元件或附件安装在相应的支架或安装板上,再将支架或安装板装在箱体上,或直接安装在箱体上。准确测量、调整安装位置后将其紧固,调整时不得重击零部件和电器元件。
- (7) 组装所用紧固件、金属件的防护层不得脱落、生锈。螺钉选择要与元件固定孔相匹配。紧固后螺钉露出螺母 2~5 个螺距,其螺栓的拧紧力矩见表 3.18-6。
- (8) 组装时要充分考虑接地连续性,箱体内任意两个金属部件通过螺栓连接时如有绝缘层均应采用相应规格的接地垫圈,并注意将接地垫圈齿面接触零部件表面,以划破绝缘层。
- (9) 安装因振动易损坏的元件时,应在元件和安装板之间加装橡胶垫减振。
- (10) 对于有操作手柄的元件应将其调整到位,不得有卡阻现象。
- (11) 将母线、元件上预留给顾客接线用的螺栓拧紧。
- (12) 各种防护板应安装到位。

表 3.18-6 螺栓的拧紧力矩

螺纹直径 (mm)		扭紧力矩 (N·m)		
米制标准值 (mm)	直径范围 d (mm)	I	II	III
2.5	$d \leq 2.8$	0.13	0.26	0.26
3.0	$2.8 < d \leq 3.0$	0.16	0.33	0.33
—	$3 < d \leq 3.2$	0.20	0.40	0.40
3.5	$3.2 < d \leq 3.6$	0.26	0.53	0.53
4	$3.6 < d \leq 4.1$	0.47	0.80	0.80
4.5	$4.1 < d \leq 4.7$	0.53	1.20	1.20
5	$4.7 < d \leq 5.3$	0.53	1.33	1.33
6	$5.3 < d \leq 6$	0.80	1.66	2.00
8	$6 < d \leq 8$	1.66	2.33	4.00
10	$8 < d \leq 10$	—	2.66	6.66
12	$10 < d \leq 12$	—	—	9.33
14	$12 < d \leq 15$	—	—	12.6
16	$15 < d \leq 20$	—	—	16.6
20	$20 < d \leq 24$	—	—	24
24	$24 < d$	—	—	33

注 1. I 栏适用于拧紧时不突出孔外的无头螺钉和不能用刀口宽度大于螺钉直径的螺钉旋具拧紧的其他螺钉。
2. II 栏适用于可以用螺钉旋具旋紧的螺母和螺钉。
3. III 栏适用于可以用螺钉旋具以外的工具旋紧的螺母和螺钉。

3.5 检查

- (1) 检查电器组装是否符合以上各条工艺要求。
- (2) 检查各种防护板是否安装到位。

4 一次线加工、装配工艺

4.1 依据和适用范围

GB 7251.1—2005《低压成套开关设备和控制设备 第一部分：型式试验和部分型式试验成套设备》
GB 5585.1—2005《电工用铜、铝母线及其合金母线 第一部分：铜和铜合金母线》
GB 5585.2—2005《电工用铜、铝母线及其合金母线 第二部分：铝和铝合金母线》
GBJ 149—1990《电气装置安装工程母线装置施工及验收规范》

适用于低压成套开关设备和控制设备中主回路母线的选择、配制、加工制作、连接和安装。产品主电路配线、制作和安装除应遵守本守则外，还应满足顾客的要求。

4.2 设备、工具、量具

4.2.1 设备

母排加工机是成套设备生产加工的主要必备设备，近年发展较快，规格品种齐全。既有母排加工柔性生产线（见图 3.18-4）、数字控制通用型三个加工单元 [见图 3.18-7 (a)]，也有手动操作便携式母线加工机 [见图 3.18-7 (b)]，可满足成套设备生产母排加工的需求。

4.2.1.1 通用型三个加工单元母线加工机

- (1) 组成及功能。机器上装有有冲孔、剪切、折弯三个加工单元、可分别进行母线的有冲孔、剪切、折弯加工。有数字控制，也有手动操作供选择，使用方便。
 - (2) 模具。有冲孔、剪切、立弯模、折弯模、冲孔模、压花、压平模具，如图 3.18-8 所示。
- 主要技术参数见表 3.18-7。

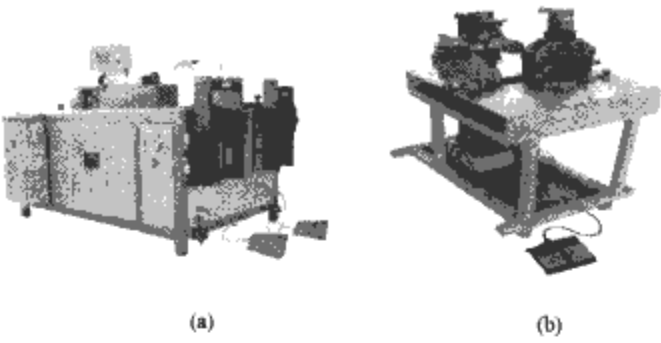


图 3.18-7 母排加工机
(a) 通用型三个加工单元母排加工机；
(b) 便携式母线加工机

表 3.18-7 通用型三个加工单元母线加工机主要技术参数

冲 孔 加 工	最大冲孔力 (kN)	200~300
	冲孔加工范围 (mm)	φ4.3~φ34
	最大加工厚度 (mm)	12
	最大加工宽度 (mm)	250
剪切加工	最大剪切厚度 (mm)	12
	最大剪切宽度 (mm)	250
折弯加工	最大折弯力 (kN)	500
	最大折弯宽度 (mm)	250
	最大折弯厚度 (mm)	12
主电动机功率 (kW)		5.5~7.5

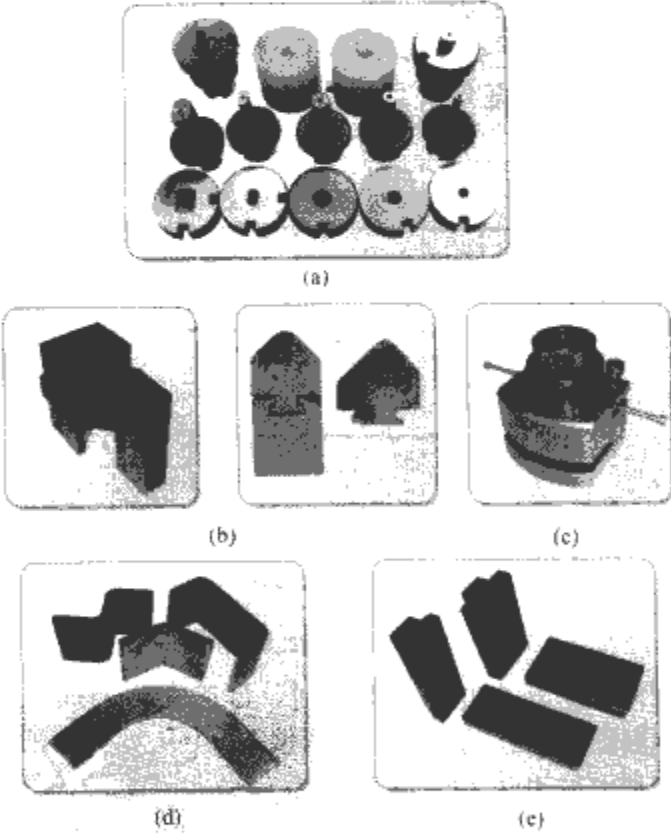


图 3.18-8 模具
(a) 冲孔模具；(b) 平弯模具；(c) 立弯模具；
(d) 样件；(e) 压平、压花模具

4.2.1.2 便携式母线加工机

有冲孔、剪切、折弯三个加工单元，特点是体积小，便于携带，常用于现场安装加工。

4.2.2 工具

扳手、力矩扳手、剥丝钳、尖嘴钳、偏口钳、剥线钳、螺钉旋具、电工刀、钢锉、端头冷压线钳、木榔头。

4.2.3 量具

盒尺、角尺、钢板尺等。

4.3 一次线的选择

4.3.1 母线种类的选择

根据用途不同一次线材料分为硬母线和绝缘导线两种。通常硬母线选用 TMY 矩形铜母线或 LMY 矩形铝母线，也可选用异型母线；绝缘导线选用 BVR 或 BV 聚氯乙烯导线。

4.3.2 主回路母线截面的选择

应考虑到短时产生的机械应力及热应力和正常的温升，绝缘材料的老化和正常工作时产生的振动，不应造成载流部件的连接有异常变化。一次线规格根据图纸要求确定，当图纸没有标明规格时，根据线路容量在工艺文件的“导线载流量表”中查找。每个企业都应根据自己产品的不同型号、类型、工艺、防护等级等设计，试验总结出母排截面积及不同根数母排及绝缘导线在不同环境温度下的载流量选用表。

4.3.3 中性线 (N)、PEN 及保护导体 (PE) 的选择

- (1) 在成套设备内 PEN 导体不需绝缘。
- (2) 结构部件不应用作 PEN 导体，但铜制或铝制安装轨道可用作 PEN 导体。
- (3) 在某些应用场合，例如大的荧光照明装置，PEN 导体的电流可能达到较高值，可以根据制造商与用户之间的专门协议，配备其载流量等于或高于相导体的 PEN 导体。

4.4 母排加工及安装

4.4.1 下料

母线要求平直，母线不得有明显的锤痕、凹坑等缺陷。母排下料一般用剪切机切断，母排在下料前或下料后应进行校正，用母排校平机对母排校直、校正。

(1) 断口处直角度偏差如图 3.18-9 所示，通常按表 3.18-8 的规定。

表 3.18-8 断口处直角度偏差 mm			
母排宽度 B	<40	>40~60	>60~120
直角度偏差 δ	0.8	1.0	1.2

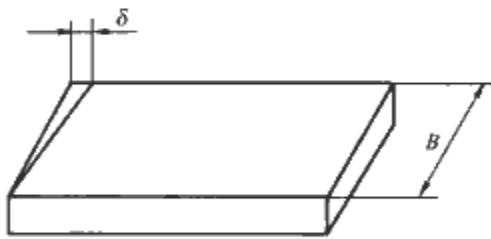


图 3.18-9 断口处直角度偏差

(2) 厚度偏差由于在剪切时，母排在剪切线上受压较大，使断面变形、减小，其厚度偏差如图 3.18-10 所示，通常厚度偏差按表 3.18-9 的规定。

表 3.18-9 mm				
母排厚度 t	3~4	4~5	5~6	6~10
厚度偏差 δ _t	0.5	0.7	1.0	1.2

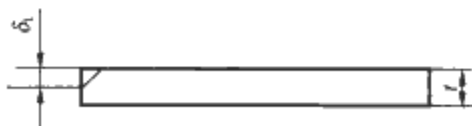


图 3.18-10 厚度偏差

(3) 去尖角。母排断口处应平滑圆整，不能有毛刺存在，以防止产生尖端放电，及便于装配维护。

4.4.2 弯制

矩形母线应尽量减少弯曲。母排弯曲部位距搭接面的边

缘通常大于 30mm，母线扭转 90°时，扭转部分的长度不应小于母线宽度的 2.5 倍，并排母线的弯曲角度要一致，保证其连接安装时，不应产生内应力，如图 3.18-11 所示。

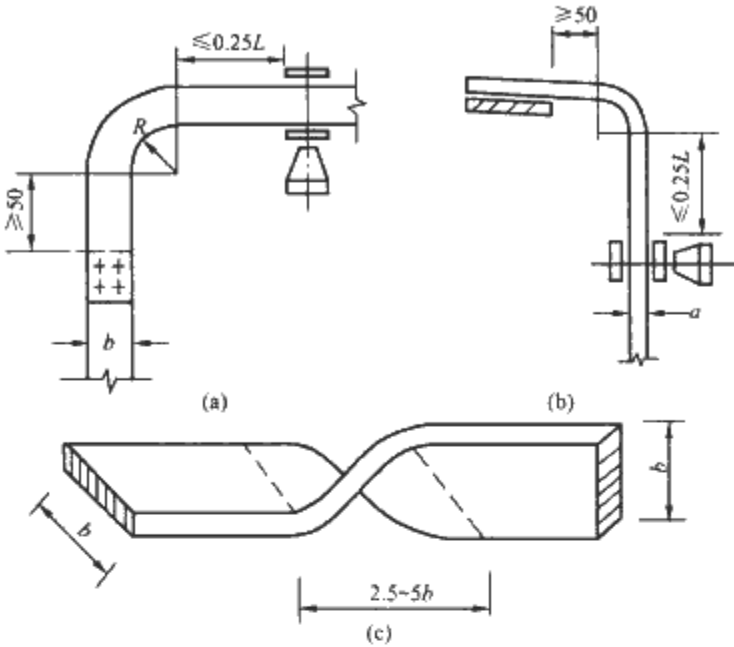


图 3.18-11 母排的平弯、立弯、扭弯
(a) 立弯；(b) 平弯；(c) 扭弯

(1) 平弯。母排平弯在弯排机上进行，将需弯曲的母排放在设备中，将尺寸线与弯排机刀口对齐，使母排弯曲，母排平弯最小允许弯曲半径见表 3.18-10。弯曲小母排可用母排加工机或台虎钳弯曲，先将母排置于台虎钳的钳口中，但钳口上应垫以铝板或硬木，以免碰伤母排，然后用手扳动母排，使母排弯曲到合适的角度。

表 3.18-10 母排最小允许弯曲半径			
弯曲种类	母线截面积 a×b (mm×mm)	最小弯曲半径	
		铜	铝
平 弯	5×50 及以下	2a	2a
	10×125 及以下	2a	2.5a
立 弯	5×50 及以下	1b	1.5b
	10×125 及以下	1.5b	2b

注 a 为母线厚度；b 为母线宽度。

- (2) 立弯。母排立弯最小允许弯曲半径见表 3.18-10。
- (3) 扭弯。母排扭弯可用扭弯机，扭弯 90°时，扭弯部分的长度为母排宽度的 2.5~5 倍。

4.4.3 母排表面及搭接触面的处理

- (1) 清除母排氧化层。铜母排采用酸洗，铝母排采用碱洗，氧化层清除后应显示出原有材料的金属光泽。
- (2) 接触表面可以根据情况确定是否涮锡或镀锡。

4.4.4 母排表面涂覆、相序标志及排列

主电路和辅助电路导体的鉴别按 GB 7251.1 执行。优先采用其中规定的标准方法进行鉴别，当采用其他方法进行，需在产品的技术文件中说明，以供用户使用。同时，在一个工程中使用的设备，例如同一变电室的低压成套开关设备，应采用同一鉴别方法，以免操作人员的误操作而带来安全隐患。

以下介绍的母排工艺供参考：

- (1) 母排表面涂覆一般可用喷涂油漆，这样不仅可以提高母排的防蚀能力，而且可以改善母排表面的散热效果，增加美观。对母排的保护套管，如果母排的表面不进行油漆涂覆，也可以套 PVC 热缩套管或进行硫化处理。

- (2) 母排相序的标志用颜色加以区别，可以采用下述方

法：底色喷涂黑色油漆，然后在底色上根据母排的宽度贴上适当大小的圆形相序标志或按相序标志要求喷涂色漆。

(3) 母排相序标志及排列参见表 3. 18-11。

表 3. 18-11 母线的标识及相序排列				
相 序	标识颜色	垂直位置	水平位置	下引线
L1 (A)	黄	上	远	左
L2 (B)	绿	中	中	中
L3 (C)	红	下	近	右
中性线 (N)	淡蓝	再下	再近	再右
接地线 (PE)	黄绿相间	最下	最近	最右

4. 4. 5 母排的搭接尺寸及连接孔

(1) 母排搭接尺寸、连接孔的数量及孔径参见表 3. 18-12，其中 A 和 B 是两根相连接母排的宽。

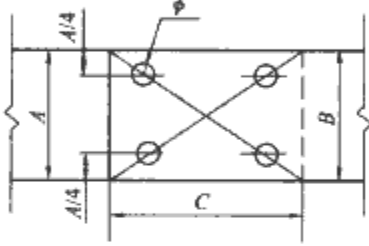
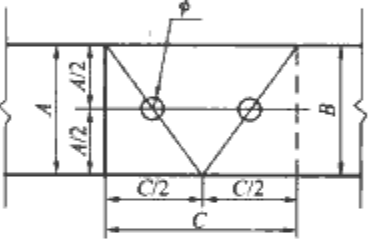
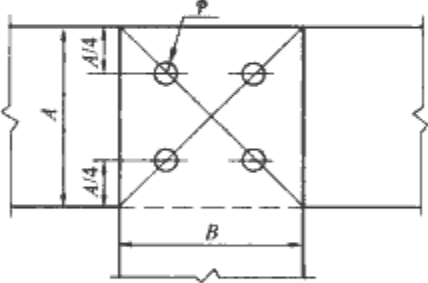
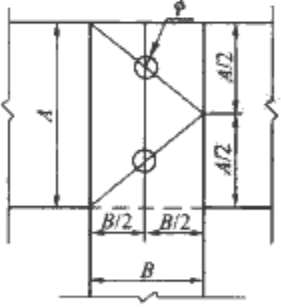
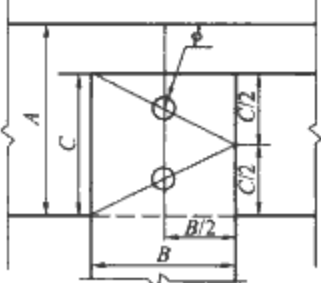
(2) 母排的连接孔，一般为圆孔。

(3) 母排的连接孔尺寸，连接孔的直径一般大于所要安装螺栓直径 0. 5~1mm。

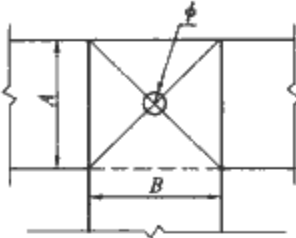
(4) 孔的加工方法一般采用钻孔或冲孔，最好是一个接触面上的 2~4 个孔用冲孔模一次冲完。

(5) 母线的搭接面应平整，截面不应有飞边，加工孔的边缘不应有毛刺。

表 3. 18-12 母排连接及开孔尺寸

搭 接 形 式	类别	序号	连接尺寸 (mm)			钻孔要求		螺栓规格
			A	B	C	φ (mm)	个数	
	直线连接	1	125	125	A 或 B	21	4	M20
		2	100	100	A 或 B	17	4	M16
		3	80	80	A 或 B	13	4	M12
		4	63	63	A 或 B	11	4	M10
		5	50	50	A 或 B	9	4	M8
		6	45	45	A 或 B	9	4	M8
	直线连接	7	40	40	80	13	2	M12
		8	31. 5	31. 5	63	11	2	M10
		9	25	25	50	9	2	M8
	垂直连接	10	125	125		21	4	M20
		11	125	100-80		17	4	M16
		12	125	63		13	4	M12
		13	100	100-80		17	4	M16
		14	80	80-63		13	4	M12
		15	63	63-50		11	4	M10
		16	50	50		9	4	M8
		17	45	45		9	4	M8
	垂直连接	18	125	50-40		17	2	M16
		19	100	63-40		17	2	M16
		20	80	63-40		15	2	M14
		21	63	50-40		13	2	M12
		22	50	45-40		11	2	M10
		23	63	31. 5-25		11	2	M10
		24	50	31. 5-25		9	2	M8
	垂直连接	25	125	31. 5-25	60	11	2	M10
		26	100	31. 5-25	50	9	2	M8
		27	80	31. 5-25	50	9	2	M8

续表

搭 接 形 式	类别	序号	连接尺寸 (mm)			钻孔要求		螺栓规格
			A	B	C	φ (mm)	个数	
	垂 直 连 接	28	40	40-31.5		13	1	M12
		29	40	25		11	1	M10
		30	31.5	31.5-25		11	1	M10
		31	25	22		9	1	M8

4.4.6 母线的连接、安装

- (1) 母线的走线方案一般由加工者确定，应考虑安装后安全可靠，检修和拆卸方便。
- (2) 装置内不同极性的裸露带电体之间以及它们与外壳之间的爬电距离应不小于标准的规定。
- (3) 矩形母线应避开飞弧区域，当交流主电路穿越形成闭合磁路的金属框架时，三相四（五）线母线应在同一框孔中穿过。
- (4) 螺母应置于维护侧，螺栓的长度应在螺帽拧紧后高出螺帽 2~5 扣。
- (5) 钢垫圈与钢垫圈之间必须保持 1mm 以上的间隙，以防止通过钢螺钉形成闭合磁路产生涡流。
- (6) 母线连接后应严密、接触良好，其连接面自然吻合。用力矩扳手检测，紧固力矩符合表 3.18-13 规定。连接用的紧固件应采用符合国家标准镀锌螺栓、螺母、弹簧垫圈、垫圈等，螺栓强度不低于 4.6 级。

表 3.18-13 螺栓紧固力矩

螺栓规格	M8	M10	M12	M14	M16	M18
力矩值 (N·m)	9~11	18~23	31~39	51~61	79~98	98~127

- (7) 母线的绝缘支撑件应满足线路短路时的动热稳定的要求。绝缘支撑件的间距应不大于绝缘支撑件短路强度试验时的间距；如果无动热稳定的要求则母线也应有足够的机械强度，例如母线长度超出表 3.18-14 规定时，中间应加固定支撑件。

表 3.18-14 母线固定支撑的间隔 mm

母线宽度	距离	母线宽度	距离	母线宽度	距离
≤30	≤300	≤50	≤600	≥60	≤900

- (8) 母排与母排、母排与电器接线端子的接触面之间应能自然吻合，母线之间的连接应保证有足够和持久的接触应力，但不应使母线产生永久性变形。检查方法是松开紧固好的母线一端，母线不应有应力。如果不能自然贴合，不要用外力强行贴合，应当将贴合不好的母排拆下重新修正好，然后再进行装配。
- (9) 母排与母排、母排与电器接线端子之间在用螺钉拧紧后，应保证接触面接触紧密。
- (10) 若同相母线由多片矩形母排并联使用时，每片间的距离应不小于每片母排的厚度。
- (11) 当母线太长时，应在中间的适当部位设置伸缩补偿接头，以便使母线有纵向伸缩的余地。
- (12) 母排与设备端子连接时，若遇到母线是铝的，设备端子是铜的，因铜与铝用螺栓直接连接，会引起接头电化腐蚀和塑性变形，将损坏接头，需安装铜铝过渡板。

- (13) 装置内不同极性的裸露带电体之间以及它们与外壳之间的最小电气间隙、爬电距离不得小于规定值。

4.5 绝缘导线的加工及安装

4.5.1 适用范围

适用于截面积为 2.5~150mm² 绝缘导线的加工及安装。

4.5.2 设备、工具

导线切断机、剥线机、端头压接机（附各种导线截面积的压接模）、端头压接冲模（与导线截面积配套）、16~25t 冲床。手动压接钳、液压钳、手动断线钳、电工钳、螺钉旋具等。

4.5.3 主要材料

4.5.3.1 绝缘导线

- (1) 导线的颜色。一般为黑色，若按相序分色时导线的颜色：
 - 1) 交流电路。A 相—黄色、B 相—绿色、C 相—红色、零线—淡蓝色、安全用接地线—黄绿双色。
 - 2) 直流电路。正—棕色、负—蓝色。
- (2) 导线型号。BVR 聚氯乙烯绝缘多股铜芯导线；RV 聚氯乙烯绝缘铜芯软导线；BXR 橡皮绝缘多股铜芯导线；BV-105 耐热聚氯乙烯绝缘多股铜芯导线；与以上绝缘导线技术性能相同的其他规格的绝缘导线。

- (3) 导线截面积的选择。导线截面积的选择必须按照产品制造规范或电路图的规定进行选择，一次回路导线最小截面不小于 2.5mm²。

4.5.3.2 铜压接端头

铜压接端头的技术性能符合 JB/T 2436.1—1992《导线用铜压接头第一部分：0.5~6mm² 导线用电缆接头》及 JB/T 2436.2—1994《导线用铜压接头 第二部分 10~300mm² 导线用铜压接头》。

常用铜压端头的型式如图 3.18-12 所示。

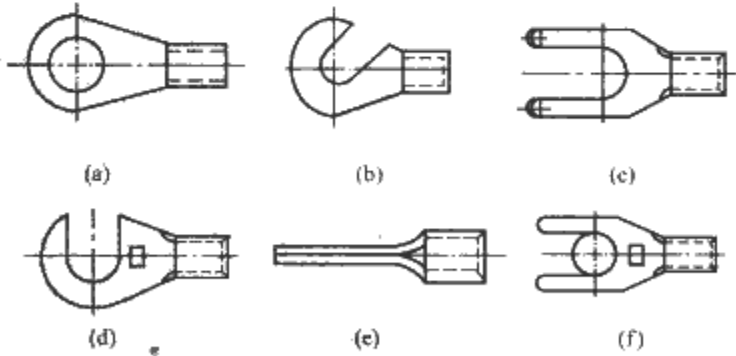


图 3.18-12 常用铜压接端头的型式
(a) TO1 型；(b) TU1 型；(c) TJ 型；(d) TC1 型；
(e) TZ1 型；(f) TUL1 型

4.5.3.3 捆扎材料

锦纶丝线、塑料绝缘单芯铁线、尼龙扎带等。

4.5.3.4 端头塑料套管

端头塑料套管 黄、绿、红。

4.5.4 端头压接

4.5.4.1 准备工作

- (1) 据导线和元器件的安装位置、敷设走向，计算出每根导线的长度。根据行线方案量材下线，下线要适当留有余量，线束走线时要长出 40~50mm，以防线束经捆扎、弯曲后长度不够，导线可用棉丝勒直，不得用台钳、刻丝钳强行拉直。
- (2) 导线截面积的选择按图样或工艺文件要求。
- (3) 根据线径不同选取剥线钳或电工钳剥线头绝缘，剥线时不应损伤线芯。线头绝缘剥去长度应按联接螺钉直径及联接方式确定在导线压接端头的部位剥除绝缘层，露出线芯的长度应略大于铜压接端头套管部分长度的 2~3mm。
- (4) 铜压接端头表面不应有毛刺、裂纹；接缝处焊接平整；银镀层光亮、无斑点等缺陷。
- (5) 使用 BVR 多股导线时，应在端头处压接经过电镀处理的铜制冷压端头。冷压端头的口径应与导线线径匹配；当导线截面在 6mm² 以下时，用手动冷压钳压接，当导线截面大于 6mm² 时应用液压钳压接。压接时其钳口要根据线径对号选用，压接后端头不得松动。

4.5.4.2 端头压接的技术要求

- (1) 端头采用冷压接，导线、端头、压接冲模（或压接模）必须匹配。
- (2) 6~16mm² 导线的端头压接可以用长柄手动压接钳压接。25mm² 及以上导线的端头压接应当采用端头压接机（一般为液压式）或用压接冲模在冲床上压接。
- (3) 端头压接前应在导线两端套上相应规格、颜色的塑料套管。端头应压紧，不得过紧或过松，压好后的截面积应等于或略大于导线截面积与端头套管截面积之和。检验导线端头是否压紧可按照图 3.18-13 的方法进行耐拉力试验，拉力负荷值按表 3.18-15 的规定。试验时不应产生端头与导线间的滑动、导线在压接部位断裂或拔出、端头变形等缺陷。

表 3.18-15 导线端头耐拉力试验的拉力负荷值

序号	导线额定截面积 (mm ²)	拉力负荷值 (N)
1	10	800
2	16	980
3	25	1200
4	30	1500
5	50	1800
6	70	2200
7	95	2800
8	120	3500
9	150	4100

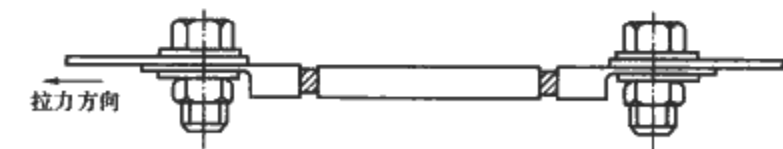


图 3.18-13 耐拉力试验

4.5.5 导线弯制

导线在端头压接好后，应按导线在成套柜中的实际位置和走向，进行弯制（弯曲），截面较小的导线可以捆扎成束弯制；截面较大的导线可以单根弯制（弯制可以用手工，也

可以在弯曲机上进行）。弯曲内半径应不小于导线绝缘外径的 2~3 倍。

4.5.6 导线连接、安装

- (1) 导线应按成套柜的主电路图的要求进行安装（敷设）。较小截面的导线应按单回路、多回路进行捆扎，但不应超过三个回路（每三相为一个回路）；较大截面的导线只能按每个回路捆扎；很大截面的导线应单根敷设，不必捆扎成线束。
- (2) 每个线束或每根大截面导线应在适当位置进行固定，以便在电路发生短路时，所产生的应力不会导致导线过大的移动或损坏其他电器元件及设备。
- (3) 导线在安装好后应保证接线正确，尽量做到横平竖直、整齐美观，并不影响导线的散热，也不影响其他电器元件及设备的正常工作。
- (4) 多根导线配置时应捆扎成线束，一般用尼龙拉扣或螺旋管捆扎成圆形。线束配置应横平竖直、整齐美观。线束应用吸盘与箱体固定，水平时每 300mm、垂直时每 400mm 固定一次。
- (5) 当导线根数较多时也可敷设于走线槽内，走线槽断面应切割整齐。
- (6) 导线接头需弯曲成圆形时，弯曲直径大于紧固螺钉直径 0.5~1mm，圆圈与导线绝缘层之间相距 2mm，弯曲方向与螺钉紧固旋转方向一致。
- (7) 导线与元件接点或母线连结时用螺钉拧紧。每个端子的接点上只允许接一根线，特殊情况时可接两根线，但必须采取措施保证连接可靠及满足 GB7251 产品标准的有关要求。
- (8) 连接到发热元件（如管形电阻）上的绝缘导线应考虑到发热对绝缘导线的影响，并采取适当的措施。绝缘导线与发热件之间的距离见表 3.18-16。

表 3.18-16 绝缘导线与发热件之间的距离

发热件 (W)	电器元件、电子元件等发热件 之间保持距离 (mm)				选用 BV、BVR 导线剥去的 绝缘长度 (mm)
	上 方		侧面	下方	
	元件允许 60°	元件允许 50°			
7.5	30	40	10	10	20
15	30	100	10	10	20
20~50	100	200	20	20	40
75~100	100	300	30	30	40
150	150	300	30	30	40
200	150	400	30	30	40

- (9) 连接导线中间不应有铰接点或焊接点，接线应尽可能在固定的端子上进行。
- (10) 一次母线上连接二次线时，需在母线上单独钻孔，用螺栓紧固，或采用母线无孔连接技术，用连接件连接。

4.5.7 检查

检查一次线的选择、制作、连接和安装是否符合以上各条工艺要求。

5 二次线（辅助电路）加工、装配工艺

5.1 依据及适用范围

依据 GB7251.1《低压成套开关设备和控制设备 第一部分：型式试验和部分型式试验成套设备》编制，适用于低压成套开关设备和控制设备中辅助电路配线加工制作。

产品辅助电路配线加工制作除应遵守本守则外，还应满足一次线（主电路）装配工艺的有关规定和用户的要求。

5.2 设备及工具

套管线号印字机、标签打印机、异形塑料管切管机、电吹风、盒尺、扳手、尖嘴钳、偏口钳、剥线钳、螺钉旋具、端头冷压线钳等。

套管线号印字机、标签打印机，也有称标示打印机，现在标示打印机已进入到与计算机、打印机技术结合的年代。即可在纸标示、套管打印，也可在聚酯薄膜上热印，或在 PVC 板上印制符号、数码、图形。精度 200~500dpi，品种规格较多。

5.3 常用行线辅件

常用行线辅件见表 3.18-17。

表 3.18-17 常用行线辅件			
序号	名称	示意图	使用说明
1	塑料夹		适应于直径为 12mm, 16mm, 20mm, 25mm 的线束固定
2	缠绕管		适应于直径为 5mm, 10mm, 15mm, 22mm, 25mm 的线束保护
3	固定座		适应于直径为 10mm, 15mm, 20mm 的线束固定
4	波纹管		适应于直径为 10mm, 13mm, 23mm, 29mm, 36mm 的线束保护
5	自粘吸盘		—
6	单螺栓固定夹		适应于直径为 5mm, 8mm, 10mm, 16mm, 20mm, 24mm, 30mm 的线束固定
7	护线齿条		适应于板厚为 1mm, 2mm, 3mm 的开孔的导线线束的保护
8	热缩管		套入导线后加热而收缩，起保护与标志作用，热缩管收缩率为 50%

5.4 二次线工艺

5.4.1 绝缘导线选择

通常辅助电路中，电压回路、控制回路导线截面积选用 1.5mm²，电流回路选用 2.5mm²，颜色黑色，型号 BVR 聚氯乙烯绝缘线，活动线束必须选用 BVR 导线。客户有特殊要求时按客户要求选取。

5.4.2 二次线制作前的准备

(1) 熟悉图纸，确定导线的型号、规格、长度、颜色。

(2) 施工前在电器元件的上方粘贴与图纸相同的代号标识。

(3) 备齐与图纸相同、清晰、打印的端头标记。

5.4.3 标识

5.4.3.1 项目代号

成套柜中安装的各种设备、电器元件、接线端子应按照电气接线图或接线表的要求安装或粘贴该元件项目代号的标签。项目代号应符合 GB 5094《电气技术中的项目代号》的规定。标签可以由金属、塑料或不干胶纸制作。标签的安装（粘贴）位置，一般放在元件的左上角或比较容易观察的位置。项目“PA”为项目代号，如图 3.18-14 所示。

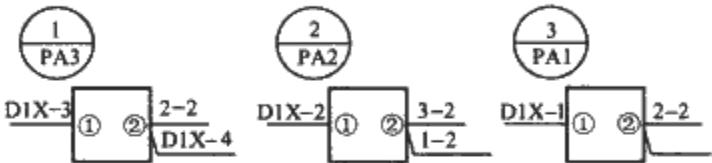


图 3.18-14 项目代号

5.4.3.2 绝缘导线标记（标号）

每根导线两端都应有标记头，标记头上写有线号及去向（通常称为线号），字迹应清晰、牢固。绝缘导线标记的目的是用来识别导线所连接的电路及相应的端子，以便于电气设备运行、维护及测试。

绝缘导线的标记必须按照电气接线图或接线表的要求制作，标记方法应符合 GB4884—1985《绝缘导线的标记》（IEC60391）的规定。

(1) 制作方法。绝缘导线标记用套管线号印字机印号。标记制作好后字迹应清晰，不易脱落或褪色。

(2) 标记方法。导线的标记一般在导线两端与端子相连接的附近。导线的标记按接线图远端标记（接线号）或原理图中的线号（见图 3.18-14）。

(3) 标记在绝缘导线上的放置位置，横放时从左至右，竖放时从下至上。

5.4.4 二次线制作和连接

(1) 根据行线方案量材下线，下线要适当留有余量，集束走线时要长出 40~50mm，以防线束经捆扎、弯曲后长度不够，下线后套端头标记。

(2) 导线可用棉丝勒直，不得用工具强行拉直。

(3) 多根导线配置时应捆扎成线束，一般用尼龙拉扣或螺旋管捆扎成圆形。线束配置应横平竖直、整齐美观。线束应用吸盘与箱体固定，水平时每 300mm、垂直时每 400mm 固定一次。

(4) 导线可敷设于走线槽内，走线槽断面应切割整齐。

(5) 根据线径不同选取剥线钳剥去线头绝缘，剥线时不应损伤线芯。线头绝缘剥去长度应按联接螺钉直径及联接方式确定。

(6) 导线接头需弯曲成圆形时，弯曲直径大于紧固螺钉直径 0.5~1mm，圆圈与导线绝缘层之间相距 2mm，弯曲方向与螺钉紧固旋转方向一致。

(7) 使用 BVR 多股导线时，应在端头处压接经过电镀处理的铜制冷压端头。冷压端头的口径应与导线线径匹配；用手动冷压钳压接，压接时其钳口要根据线径对号选用，压接后端头不得松动。

(8) 导线与元件接点或母线连结时用螺钉拧紧。每个元件的接点最多允许接 2 根线，两个接头间要加垫一个与螺钉直径相称的垫圈。

(9) 二次线过门时应予可靠固定，并留有充分的旋转余

地, 保证门开启时导线不受损伤。

(10) 根据行线方案需要弯曲转换方向时, 不得用尖嘴钳或其他锋利工具弯曲, 以保证导线绝缘层不受损伤。导线弯曲半径不得小于导线外径的 2 倍。

(11) 每根导线接线前弯曲时应美观、一致, 留有意外损伤后再接头的余量。

(12) 每根导线两端都应有标记头, 标记头上写有线号及去向, 字迹应清晰、牢固。

(13) 导线中间不得接头。

(14) 为电器检修或更换方便, 导线与电器触头之间不得采用焊接, 应采用接线端子过渡。

(15) 连接到发热元件(如管形电阻)上的绝缘导线应考虑到发热对绝缘导线的影响, 并采取适当的措施。绝缘导线与发热件之间的距离见表 3.18-16 的规定。

5.4.5 行线工艺

5.4.5.1 行线的基本要求

(1) 导线及线束应排列均匀、合理, 做到横平竖直, 整齐美观。相同产品的走线方式应相同。

(2) 导线不允许承受应力, 以免影响导线的正常运行, 在线束的转弯处应有圆弧过渡, 并用蛇皮管包裹, 过门线应用黄绿双色软线连接。

(3) 线束的捆扎不应损伤绝缘导线的绝缘层。

(4) 禁止使用焊接或绞接的方式加长导线。

(5) 绝缘导线穿越金属构件时, 应采取使绝缘导线不被破坏的措施, 如在导线穿越的金属板的孔上戴橡胶圈、塑料护齿条或绝缘护套等保护导线。

(6) 二次线线束不应直接敷设在导电部件或铁板上, 应采用一些相应的保护措施, 如用走线槽、螺旋管缠绕、尼龙拉扣将线束固定在吸盘上等。

(7) 每个线束都应捆扎固定应不因元器件的操作产生位移及晃动。

5.4.5.2 行线方式

(1) 嵌入式胶膜固定或用螺钉固定在开关柜上。槽内线束可以不捆扎, 但应排放整齐。为了便于散热及方便检修, 槽内线束一般不要超过 50 根导线。

(2) 固定式。将线束均匀、整齐地固定在塑料线夹、自粘塑料吸盘上或固定在金属条架(金属条架用塑料袋包扎一层)如图 3.18-15 所示。

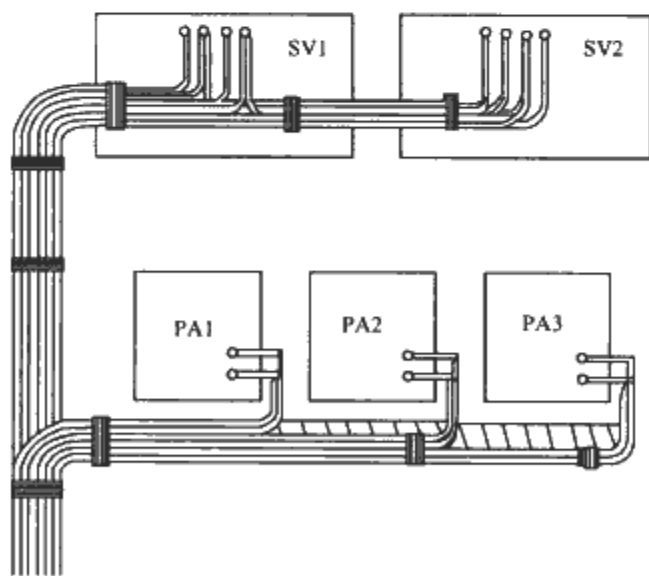


图 3.18-15 固定式行线

(3) 预制式。在成批生产的条件下, 如大量相同的抽屉的二次接线, 可以在预制模板(或样品)上预制线束, 然后再放到设备上安装, 整理及固定, 这样可大量节省导线, 提

高工效, 降低劳动强度, 提高经济效益。

5.4.5.3 线束制作

(1) 线束可以制成方形、长方形或圆形, 推荐采用圆形线束。线束捆扎的距离, 视线束大小定为 100~200mm。

(2) 线束及导线的排列应符合要求。

(3) 线束的捆扎应挺直, 不得有明显的扭曲与导线交叉。

(4) 线束内弯曲半径 R 应大于线束直径 d 的 2 倍, 如图 3.18-16 所示。

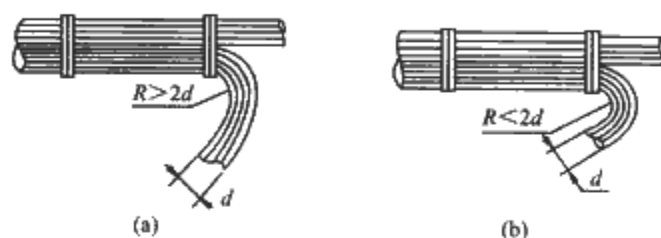


图 3.18-16 线束内弯曲半径要求
(a) 合格; (b) 不合格

5.4.6 检查

(1) 检查二次线的选择、制作和安装是否符合以上各条工艺要求。

(2) 检查连接处的螺栓是否紧固。

(3) 按图纸要求检查接线是否正确。

6 产品包装工艺

6.1 总则

(1) 为使产品在储存、搬运和交付的全过程保持合格的质量, 必须根据产品的易损程度及其不同特点, 选用不同的包装材料和包装方式。

(2) 选用的包装材料和包装方式必须符合国家现行的相关技术标准, 且不能对产品的质量产生不良影响。

(3) 近距离运输的产品可以采用简易包装; 要求远距离运输的产品, 所采用的包装必须符合铁路或公路运输的要求, 满足长途运输及多次投递的需要。

(4) 采用的包装应牢固、可靠, 除此之外还应便于运输过程中的搬运, 如用叉车、吊车装运。

(5) 冬季发运产品时, 对不适宜低温储存、运输的仪器、仪表、电气设备还应采取可靠的防冻措施。

6.2 包装

(1) 电气柜(箱/台)在进行空运、铁路运输和长距离公路运输时, 必须采用木制包装箱包装, 在短距离公路运输时可采用简易包装。

(2) 木箱包装。

1) 采用木箱包装时, 首先应将柜、箱、台内元件紧固, 柜门锁紧, 必要时要将易损元件拆下独立包装。

2) 木箱包装底座要保证一定厚度, 柜体与底座必须用螺栓牢靠连接, 多点固定, 防止产品在运输过程中松动, 造成产品碰撞损伤。包装底座必须有插孔, 便于装卸过程中叉车、吊车装运。

3) 产品表面应覆盖一层防水塑料套, 或用塑料布缠裹。产品与包装箱体之间要加防护层, 如在柜体四周和顶部填充气垫膜、防震泡沫、泡沫塑料板等, 以防止在运输过程中产品质量受损。

4) 封装木制包装箱时, 箱体侧板要与底座固定牢靠, 箱体的边角要用规格合适的钉子钉牢, 并使用铁包角, 保证

包装箱结构牢固。

(3) 简易包装。简易包装应在产品上覆盖防水塑料套，或用塑料布缠绕，外加保护层，如外缠气垫膜、铺垫泡沫塑料板等保护措施，防止运输过程产品质量受损。

6.3 包装标识

(1) 木箱包装完毕，在箱体表面应进行标识客户名称、合同号、产品型号、产品编号、到站、客户地址、防护要求等。并在箱体明显处标识小心轻放、防雨、起吊方向等符号。

(2) 简易包装能直接看清产品铭牌时不用另行标识，铭牌被挡住时，应选用适当的方法标识客户名称、合同号、产

品型号、产品编号等，以辨别不同的产品。

6.4 其他

(1) 包装箱内应附有产品合格证、图纸资料、相关证件、随机附件清单等。

(2) 产品在运输过程中的摆放应注意防止挤靠，箱体与箱体之间、箱体与其他货物之间的净距离不小于 100mm。

(3) 包装箱在搬运过程中应注意禁止摔、倒、砸、挤。

(4) 木箱包装过程中检验员要监督检查包装是否符合要求，包装完毕，操作人填写《产品包装检验记录》交检验员检验，检验合格后才可办理入库手续。简易包装操作人自检合格即可办理入库手续。

参 考 文 献

- [1] GB 7251.1—2005 低压成套开关设备和控制设备 第1部分:型式试验和部分型式试验成套设备.
- [2] Klaus kosack. 低压开关电器和开关设备手册. 胡明忠, 胡沫非, 译. 北京:机械工业出版社, 1999.
- [3] Gunter Seip. G. 电气安装技术手册·2版. 北京:中国建筑工程出版社, 2002.
- [4] GB 14050—1993 系统接地的形式及安全技术要求.
- [5] GB/T 16935.3—2008 建筑物电气装置 第5部分:电气设备的选择和安装 第54章:接地装置和保护导体.
- [6] GB 7251.2—2006 低压成套开关设备和控制设备 第2部分:对母线干线系统(母线槽)的特殊要求.
- [7] 刘凤君. 市电电能质量补偿技术. 北京:科学出版社, 2005.
- [8] JB/T 8511—1996 空气绝缘母线干线系统(母线槽).
- [9] JB 10327 耐火母线干线系统(母线槽).
- [10] 中国工业经济联合会, 中国电器工业协会. 中国母线槽总览. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [11] 唐志玉. 塑料模具设计师指南. 北京:国防工业出版社, 1999.
- [12] GB 7251.3—2006 低压成套开关设备和控制设备 第3部分:对非专业人员可进入的低压成套开关设备和控制设备—配电板的特殊要求.
- [13] GB 7251.4—2006 低压成套开关设备和控制设备 第4部分:对建筑工地用成套设备(ACS)的特殊要求.
- [14] GB 7251.5—2008 低压成套开关设备和控制设备 第5部分:对公用电网——动力配电网成套设备的特殊要求.
- [15] GB/T 7251.8—2005 低压成套开关设备和控制设备 智能型成套设备通用技术要求.
- [16] JB/T 8456—2005 低压直流成套开关设备.
- [17] 陈永真. 电容器及其应用. 北京:科学出版社, 2005.
- [18] GB 14048.6—1998 低压开关设备和控制设备 接触器和电动机起动器 第2部分:交流半导体电动机控制器和起动器.
- [19] JB/T 10250—2001 交流电动机电力电子软起动装置.
- [20] TIMOTHY M. ROWAN. 可控硅电压控制改进感应电动机性能的定量分析. 国外电力电子技术, 1988 (3).
- [21] 汪长遂. 美、英感应电动机节能控制器发展概况. 节能技术, 1988 (1).
- [22] 张慕良. 交流鼠笼电动机, 软起动技术的原理及应用. 湖南电气工程应用, 1995 (6).
- [23] 徐永根, 中国航空工业规划设计研究院, 等. 工业与民用配电设计手册. 北京:中国电力出版社, 1994.
- [24] 苏文成, 金子康, 等. 无功补偿与电力电子技术. 北京:机械工业出版社, 1989.
- [25] GB/T 17467—1998 高压/低压预装式变电站.
- [26] 姜齐荣, 赵东元, 陈建业. 有源电力滤波器. 北京:科学出版社, 2005.
- [27] 天津传动设计研究所. 电气传动自动化技术手册第二版. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [28] 工厂常用电手册编写组. 工厂常用电气册. 下册. 北京:中国电力出版社, 1998.
- [29] GB 14048.1—2006 低压开关设备和控制设备 第1部分:总则.
- [30] GB/T 14048.7—2006 低压开关设备和控制设备 第7-1部分:辅助器件 铜导体的接线端子排.
- [31] GB/T 14048.8—2006 低压开关设备和控制设备 第7-2部分:辅助器件 铜导体的保护导体接线端子排.
- [32] JB/T 4261—1999 低压成套开关设备和控制设备 辅件术语.
- [33] JB/T 9659.1—1999 低压成套开关设备和控制设备用接线端子排 第1部分 组合型和底座封闭型接线端子排.
- [34] JB/T 10263—2001 低压抽出式成套开关设备和控制设备辅助电路用接插件.
- [35] JB/T 10323—2002 低压抽出式成套开关设备和控制设备主电路用接插件.
- [36] JB/T 10316—2002 低压成套开关设备和控制设备用母线架.
- [37] JB/T 2436.1—1992 导线用铜压接端头 第1部分:0.5~6mm² 导线用铜压接端头.
- [38] JB/T 2436.2—1994 导线用铜压接端头 第1部分:10~300mm² 导线用铜压接端头.
- [39] JB/T 6330—1992 TG1 型管状端头.
- [40] JB/T 8457—1996 冷挤压压接钳的一般要求和试验方法.
- [41] JB/T 9660—1999 行线槽.
- [42] JB/T 8458—1996 电气设备辅件塑料制品一般要求和试验方法.
- [43] JB/T 9665—1999 低压成套开关设备和控制设备辅件产品型号编制方法.
- [44] JB/T 56187—1994 接线座产品质量分等.
- [45] IEC 60670: 1989 家用和类似用途固定式电气装置电器附件外壳的通用要求.
- [46] 日本电气学会. 电工手册. 北京:机械工业出版社, 1984.

第4篇 低压电器与成套设备 可靠性技术

主编单位：河北工业大学

浙江天正电气股份有限公司

人民电器集团有限公司

沪川集团有限公司

杭申控股集团有限公司

厦门宏美电子有限公司

TCL 低压电器(无锡)有限公司

主 编：王景芹 苏秀苹 高天乐 潘伟杰 郑建荣 马传兴
黄立军 王振宇

编写人员：王景芹 (河北工业大学)
苏秀苹 (河北工业大学)
陆俭国 (河北工业大学)
高天乐 (浙江天正电气股份有限公司)
潘伟杰 (沪川集团有限公司)
郑建荣 (人民电器集团有限公司)
马传兴 (杭申控股集团有限公司)
黄立军 (厦门宏美电子有限公司)
王振宇 (TCL 低压电器(无锡)有限公司)
孔 军 (TCL 低压电器(无锡)有限公司)

黄章武 (人民电器集团有限公司)

骆燕燕 (河北工业大学)

刘帼巾 (河北工业大学)

赵靖英 (河北工业大学)

聂俊岚 (燕山大学)

王海涛 (河北工业大学)

田新疆 (厦门宏美电子有限公司)

李 芑 (浙江天正电气股份有限公司)

胡廷东 (杭申控股集团有限公司)

第1章 概述

在近代科学技术突飞猛进的发展过程中,可靠性技术随着生产和科学技术的发展而产生,同时在不断地应用可靠性技术解决实际问题的过程中,也促进了生产和科学技术的发展。产品可靠性是指产品在规定的条件下及规定的时间内完成规定功能的能力。而可靠性技术就是指与产品可靠性有关的工程方法。可靠性技术已有几十年的历史。第二次世界大战中,电子设备大量用于军用装置,经常发现各类电子设备不能有效地投入使用。在20世纪50年代初期的一次战争中,这个问题暴露得更为明显。美国的雷达设备经常不能正常工作而处于待修状态。电子设备可靠性不高使维修费用很高,这就促使美国开始重视可靠性问题,并着手进行调查、研究及试验工作,从而揭开了电子设备领域内可靠性研究的序幕。早期的研究重点放在电子管方面,在确定电子管的性能时,不仅重视其电性能,而且重视其耐振及耐冲击等环境适应性。20世纪50~60年代是可靠性技术飞速发展的10年,美国国防部成立了各种可靠性研究组织。例如,1950年成立了AdHoC可靠性小组,1952年成立了AGREE(电子设备可靠性顾问组),1957年成立了ACGMR(AdHoC导弹可靠性委员会)等。在这些组织领导下,大规模地开展了可靠性管理、可靠性分析及可靠性试验等方面的工作。同时,美国各有关技术协会及一些公司、制造厂也开展了大量可靠性研究工作。20世纪60年代后期,发布了不少有关可靠性管理、可靠性设计及可靠性试验鉴定等方面的标准,电子元器件及电子设备方面的可靠性技术渐趋成熟。20世纪70年代,美国在可靠性研究方面逐渐深入到机械、电工、电力、化工等领域。综上所述,在从事可靠性研究方面,美国是开展得最早、范围最广、最有成效的国家。此外,日本、英国、法国、德国、苏联等国家也积极开展可靠性研究工作,至今也已取得很大的成效。苏联不仅制定了不少可靠性基础标准,而且对不少产品已制定了可靠性标准或在产品标准中规定了可靠性要求及可靠性试验方法,同时还出版了不少可靠性方面的书籍及手册,如1985年出版了由乌沙柯夫(И. А. УШАКОВ)编写的《系统可靠性技术手册》等。

1 国内外电器可靠性工作概况

1.1 国外电器可靠性工作概况

电器可靠性研究与应用工作已成为国外电器工厂及研究部门的一项重要工作。目前,国外有些电器产品已规定了可靠性指标,有些电器产品虽还未明确规定可靠性指标,但在工厂内部大多已在开展产品的可靠性工作,并把产品可靠性的

1.1.1 可靠性标准的制定

国外可靠性标准的制定工作进展很快,特别是可靠性基础标准的制定进展更快。IEC TC56 可靠性技术委员会从1965年成立以来,已发布了不少有关可靠性与维修性的标准。1988年IEC TC56在东京召开年会,会议决定采用“工具箱原理”构成TC56的标准体系。所谓“工具箱原理”是

指把标准及文件分成4类,即顶端文件(IEC 300)、应用指南、工具类、支持文件。其中顶端文件IEC 300《可靠性与维修性管理》是一个可靠性管理方面的基础标准。应用指南类标准主要包括可靠性要求规范、可靠性设计分析、元(部)件可靠性预计、可靠性试验、可靠性增长、可靠性筛选、软件可靠性、维修性技术和现场评估。工具类标准主要包括IEC 605《设备可靠性试验》和IEC 706《维修性导则》两个系列标准。

在电器产品可靠性标准制定方面,国外第一个有可靠性要求的电器产品标准是1964年发布的美国军用标准MIL-R-39016《有可靠性指标的电磁继电器总规范》;日本于1980年发布了日本工业标准JIS C5440《有可靠性要求的控制用小型继电器通则》,并在1981年发布的JIS C4530《拍合式电磁继电器》与1982年发布的JIS C4531《接触器式继电器》中都规定了失效率试验的方法。IEC原TC41在所制定的IEC 255-0-20《电气继电器的触点性能》、IEC 255-10《电子元件质量评价系统在有或无继电器上的应用》及IEC 255-19《机电式有或无继电器的质量评价》等标准中也有关于可靠性的内容。此外,IEC原SC 41A于1988年6月发出41A(秘书处)46号文件,提出在现有IEC标准基础上补充《应用于小电流的有或无继电器的可靠性试验》的报告。2002年IEC 60050-444《电工术语 基础继电器》中规定了10条关于可靠性的术语。苏联在不少电器产品标准中都列入了可靠性要求与可靠性试验方面的内容,例如,1983年发布的ГОСТ 12434—1983《低压开关电器通用技术条件》中就规定了产品的可靠性要求。德国在VDE 0660《低压开关电器规范》中规定了产品机械寿命和电寿命的额定值取占全部接触器90%的接触器所能达到的极限通断次数,这实际上也用可靠度等于0.9时的可靠寿命的概念来考核接触器的机械寿命和电寿命。法国在NFC 63—100《工业用低压控制设备—接触器》中规定了对成批生产的电器,特别是约定发热电流小于或等于40A的电器,机械寿命是在有代表性的样机上以重复方式进行试验的,制造厂在统计了试验结果后给出产品的机械寿命值。这实际上也是用可靠性的概念来确定接触器的机械寿命。

1.1.2 可靠性试验与可靠性试验装置的研制

美国、日本在电器的可靠性寿命试验中已普遍采用电子计算机进行控制与检测,如日本安川电机株式会社在继电器的接触可靠性试验中采用了电子计算机进行控制与检测的自动试验装置;日本松下电器产业株式会社在继电器可靠性寿命试验中采用了微型计算机控制的全自动试验装置;日本富士通株式会社在舌簧继电器的可靠性试验中也采用了计算机控制的试验装置,该装置可同时进行200个舌簧管的寿命试验;美国用微处理机控制的RT160型继电器可靠性寿命试验装置具有能自动测量触点的接触压降等多项参数、试验结果的显示及打印等功能。德国的电器公司一般都经常做接触器的寿命试验。例如,西门子集团公司生产的接触器,每周抽一次样品,两个月共抽20~30台($I_N \leq 32A$)或10~15台($I_N > 32A$)为一组进行机械寿命试验,试到每台试品都

坏了为止。根据试验结果用威布尔概率纸定出可靠度 $R=0.9$ 时的可靠寿命,此值不应低于产品样本上规定的机械寿命值。西门子集团公司接触器的电寿命试验的每组台数与机械寿命试验时相同,但每月抽一次样品进行试验,一年所抽的样品为一组。法国的特力遥控机械公司的接触器每月抽10台样品进行机械寿命试验;日本的S型接触器也是每月抽2~20台进行机械寿命试验。

1.1.3 加速寿命试验的研究

美国、日本等国都在对电器加速寿命试验的模式、方法及数据分析方法进行研究。例如,日本以负载电压及负载电流为加速变量进行了开关的加速寿命试验,根据试验结果算出了不同负载电压和负载电流值时的加速系数。

1.1.4 可靠性设计的研究

美国、日本等国都十分重视产品的可靠性设计。例如,美国、日本、德国等国的各大电器公司都设计并开发了智能型断路器,大大提高了供电可靠性。高级的智能化断路器不仅可以远距离地把信号传输给控制室的计算机,还可以接收来自计算机的指令,实现系统的自动化与双向通信。

1.1.5 可靠性物理的研究

国外是从20世纪60年代才开始研究可靠性物理的。美国空军ROME航空发展中心在20世纪60年代初首先开始对现场失效的元器件进行失效分析。J. Vaccro首先提出用“失效物理学”这一概念来研究元器件的可靠性。从1962年起美国每年召开一次“失效物理”会议,从1967年起改称“可靠性物理”会议。所谓“可靠性物理”就是专门研究产品失效机理的科学。它对产品怎样失效和为什么失效的具体物理、化学过程进行研究。可以看出,可靠性物理学的研究是提高产品可靠性的基础性研究。

美国、日本等国对可靠性物理的研究都很重视。在电磁继电器方面,对继电器触点的接触性能及电磁系统等部分的可靠性进行了深入的研究,通过大量的试验和对实际使用的调查,掌握了继电器在工作中的各种故障形式及产生故障的各种原因。其中,对触点接触可靠性的研究尤为重视。他们研究了各种使用环境条件对接触可靠性的影响,对触点的材料、形状、接触方式、接触压力等进行了全面的分析,并对产品的设计和使用提出了要求。在电磁接触器方面,日本对接触器使用中发生的故障进行了大量调查,调查结果表明,接触器的可靠性除了取决于设计和制造外,正确使用与否对其可靠性影响也很大。

1.1.6 提高电器可靠性的研究

美国、日本等国都很重视提高对电器产品可靠性的研究工作。例如,德国R型继电器在触点附近装设能吸收有机气体的材料后,就能减少触点的污染,从而减小了触点接触电阻并提高了继电器的可靠性。匈牙利Istvan Neveri指出,动、静触头采用不同材料适当配对时能提高接触器的寿命及工作可靠性。苏联舍甫钦柯在《自动控制电器的运动与冲击》一书中指出:“在接触器桥式触头与触头支架之间装泡沫塑料衬垫作为缓冲器,并在接触器的每一极上装两个或两个以上在闭合次序上有先后的并联触头,虽然每个触头在闭合时可能产生振动,但并联触头中总有一对或一对以上的触头使电路保持在闭合状态,这样可达到消除触头振动的目的,从而提高了接触器的可靠性。”

1.2 国内电器可靠性工作概况

我国原机械工业部对电器的可靠性工作十分重视。早在20世纪70年代末,原机械工业部电工局委托河北工业大学

举办了两期电器新技术学习班,可靠性技术是其中主要内容之一。1981年,在原机械工业部领导下成立了中国电工技术学会,并于1983年10月成立了该学会的电工产品可靠性研究会,在该学术组织的领导下开展了电工产品可靠性研究与学术交流活动,并多次举办了电器可靠性学习班及电工行业领导干部可靠性学习班。原机械工业部在1986年以(86)机技函字1701号文发布了《关于加强机电产品可靠性工作的通知》,以后又曾多次正式发文并召开可靠性工作会议部署在机械行业中开展“限期考核机电产品可靠性指标”的工作。1994年8月,原机械工业部再次召开了机械工业可靠性工作会议,会上提出可靠性必须从产品设计开发抓起,凡是列入部或省市机械厅局开发计划和重大技术装备攻关的项目,应加强可靠性设计和试验研究工作,要求立项时提出可靠性设计目标,产品鉴定和项目验收时应对可靠性目标进行审核评定。会上还决定在机电产品中进一步开展可靠性认定工作。

在上海电器科学研究所、许昌继电器研究所、成都机床电器研究所等原归口研究所的组织下,从20世纪80年代中期开始,在电器行业中开展了可靠性研究工作。电磁式中间继电器可靠性研究、小容量交流接触器可靠性研究等项目被列为原机械工业部“七五”重点项目。由研究所、高等学校及有关企业合作开展了上述项目的研究工作,通过理论分析和大量试验研究,分析了这些电器产品的失效机理,研制了可靠性试验装置,提出了这些产品的可靠性指标及考核方法,指导工厂改进产品设计和制造工艺,提高了产品的可靠性。

从20世纪80年代中期至今,电器行业在可靠性工作方面共进行了下列工作:

1.2.1 制定了可靠性试验与考核标准

制定了GB/T 15510—1995《控制用电磁继电器可靠性试验通则》及GB 10962—1989《机床电器可靠性通则》,JB/T 10493—2005《家用和类似用途的过电流保护断路器可靠性试验方法》、JB/T 10494—2005《家用和类似用途的剩余电流动作断路器可靠性试验方法》、JB/T 10522—2005《小容量交流接触器可靠性试验方法》、JB/T 10712—2007《过载继电器的可靠性试验方法》及JB/T 10711—2007《塑料外壳式断路器的可靠性试验方法》等行业标准。

1.2.2 可靠性试验装置的研制

研制出了贯彻GB/T 15510—1995的继电器可靠性试验装置,贯彻行业标准JB/T 10522—2005、JB/T 10493—2005及JB/T 10494—2005的接触器可靠性试验装置、小型断路器可靠性试验装置及漏电保护器可靠性试验装置。

1.2.3 限期考核可靠性指标的工作

1986年~1991年5月,原机械工业部先后共发布了七批(共1189种规格)限期考核可靠性指标的机电产品清单,其中包括几十种规格的电器产品,完成了几十种规格的控制继电器、交流接触器、熔断器等电器产品的可靠性指标的限期考核工作。

1.2.4 电器可靠性设计的研究

运用应力强度干涉模型开展了电器中关键零部件即杆件、弹簧、电磁系统的可靠性设计技术研究,并采用冗余设计等技术开展了触头可靠性设计的研究。

在电器可靠性研究方面,虽然做了上述几方面的工作并取得了一定进展,但由于我国电器产品的可靠性研究工作起步较晚,至今仅对继电器、接触器、小型断路器及漏电保护器等部分电器产品进行了可靠性试验与考核工作,不少主要

电器产品还未开展可靠性研究与考核，在电器新产品开发时还未开展可靠性设计与可靠性制造，特别是我国电器制造企业对电器产品可靠性工作还重视不够，一般还未设置专门的可靠性管理机构，可靠性工作还未认真开展。我国电器产品的可靠性水平普遍低于国外发达国家电器产品的可靠性水平。

2 可靠性定义

上面已指出，产品的可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间（或操作次数）内完成规定功能的能力。

上述定义中的“完成规定功能”是指完成全部规定的技术性能。所谓规定的条件是指产品使用时的负载条件、环境条件及储存条件。

为了能定量地描述产品可靠性的_{高低}，所以引入可靠度的概念。电器产品的可靠度是指产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的概率，一般用 R 表示。例如，某种规格的接触器操作至 10^6 次时的可靠度为 90%，就是指若多次抽取 n 个该规格的接触器在规定的条件下操作至 10^6 次时，平均有 90% 的接触器能按规定的条件完成规定的功能。产品的可靠性是产品质量的一个重要方面。电器产品的质量应包括其技术性能指标和可靠性指标两个方面。这两者之间既有联系又有区别，假如产品的可靠性不高，即使其技术性能指标很先进，也不能认为产品质量好。

3 失效规律

产品的失效率 $\lambda(t)$ ，是指已工作到时刻 t 的产品在 t 时刻后的单位时间内发生失效的概率。很多产品的失效率 $\lambda(t)$ 与时间 t 的关系曲线如图 4.1-1 所示。图 4.1-1 中的曲线通常称为“浴盆曲线”。从曲线上可看出，产品失效率随时间的变化大致可划分为三个阶段，即早期失效期、偶然失效期与耗损失效期。

(1) 早期失效期。此时期出现在产品工作早期。其特点是产品失效率较高，但随工作时间的增加而降低。

(2) 偶然失效期。此时期内产品的失效是随机性的。其特点是产品失效率高且稳定，并接近于常数，此时期是产品的最佳工作时期。

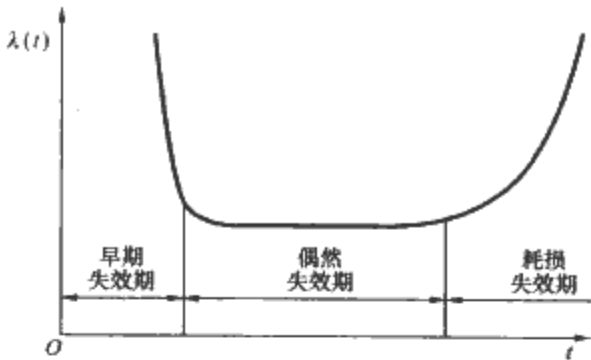


图 4.1-1 产品典型失效率曲线

(3) 耗损失效期。此时期出现在产品工作后期。其特点是产品失效率随工作时间的增加而明显增高。

4 可靠性技术的基本内容

可靠性技术就是与可靠性有关的工程方法。影响产品可靠性的因素很多，从确定产品可靠性指标、研究、试制、设计、制造、试验、鉴定直到投入使用为止的各个阶段，都与可靠性密切相关，而且产品失效后对产品进行的失效分析也与产品可靠性密切相关。对于可靠性试验工作量较大或产品生产批量较小、价格较高的电器产品来说，对失效产品进行的失效分析尤为重要。

图 4.1-2 为产品可靠性技术基本内容的框图。图 4.1-2 中表示了通过产品可靠性设计、可靠性制造、可靠性筛选、可靠性试验、现场使用，以及对失效产品进行失效分析，并将所得到的信息反馈到可靠性设计、可靠性制造及可靠性筛选中去，以找到相应改进措施的全过程。

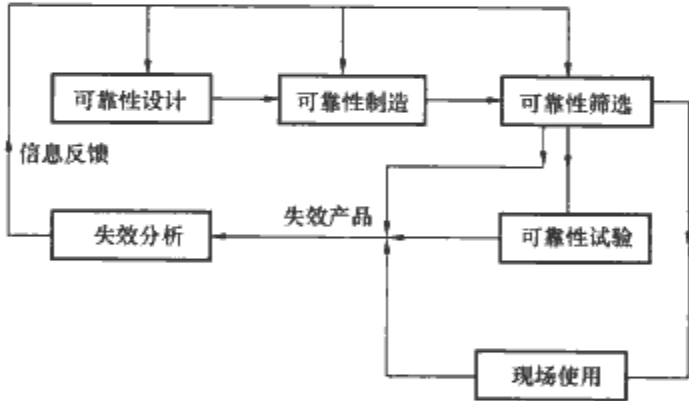


图 4.1-2 产品可靠性技术基本内容的框图

第 2 章 失效密度函数及累积失效分布函数

一批产品在进行寿命试验时,各个产品失效时间(对频繁操作的某些元件来说,指试验到元件失效为止的操作次数)可能相差很多,但是失效数据是遵循一定规律的,用数理统计的语言来说,产品的失效时间是服从一定分布的。只要对失效数据进行适当的处理,就能找到反映事物本质的规律性。画失效频率直方图和累积失效频率直方图就是一种失效数据的加工处理方法。从失效频率直方图中可以直观地看出失效数据的大致分布情况。

1 失效频率直方图

从一批产品中抽取 n 个产品进行寿命试验,设所测得各试品的失效时间(即寿命)为 t_1, t_2, \dots, t_n , 则可按以下方法处理。

(1) 按一定时间间隔 Δt (Δt 称为组距) 把失效时间分成若干范围, 即把 n 个失效数据分成若干组。分组数 k 可由式 (4.2-1) 确定

$$k = 1 + 3.3 \lg n \tag{4.2-1}$$

(2) 列表表示各组失效时间的范围以及各组的 t_{zi} , Δm_i , f_i^* , F_i , f_i 的数值。其中 t_{zi} 为第 i 组的失效时间范围的中值; Δm_i 为第 i 组中的失效数据的个数(失效频数); f_i^* 为第 i 组的失效频率, 即第 i 组的频数 Δm_i 与失效数据总数 n 之比, 即

$$f_i^* = \frac{\Delta m_i}{n} \tag{4.2-2}$$

F_i 为第 i 组的累积失效频率, 即从第 1 组到第 i 组的失效频率的和, 即

$$F_i = \sum_{j=1}^i f_j^* = \sum_{j=1}^i \frac{\Delta m_j}{n} \tag{4.2-3}$$

f_i 为第 i 组的失效频率 f_i^* 与组距 Δt 的比值, 即

$$f_i = \frac{f_i^*}{\Delta t} \tag{4.2-4}$$

(3) 作失效频率直方图。以失效时间 t 为横坐标, 以 f_i 为纵坐标, 以矩形的形式做成的直方图称为失效频率直方图, 如图 4.2-1 所示。

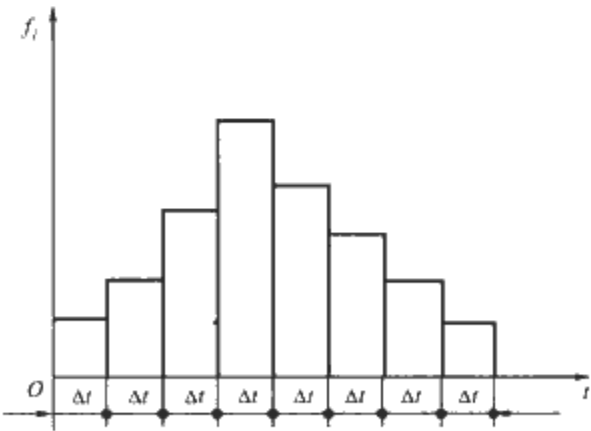


图 4.2-1 失效频率直方图

2 失效密度函数

如果在数据处理时, 将组距 Δt 取得小些(即分组数多

些), 则可作出新的失效频率直方图, 其分布情况与图 4.2-1 是一致的, 但相邻矩形的高度差缩小了。当试验数据越来越多, 并不断缩小组距, 即 Δt 越来越小时, 失效频率直方图中各矩形顶部的轮廓线将趋近于一条光滑的曲线, 它就是失效密度曲线, 如图 4.2-2 所示。其数学表达式 $f(t)$ 就称为失效密度函数。

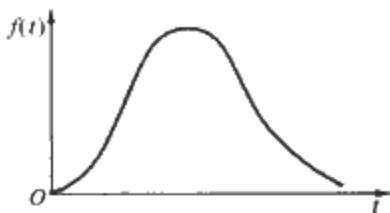


图 4.2-2 失效密度函数曲线

由于图 4.2-1 中的各矩形面积之和等于 1, 所以图 4.2-2 中失效密度曲线与横坐标轴间的面积也等于 1, 这是失效密度函数 $f(t)$ 的一个重要性质, 即

$$\int_0^\infty f(t) dt = 1 \tag{4.2-5}$$

失效时间 L 在区间 $[a, b]$ 内取值的概率 $P(a \leq L \leq b)$ 等于 $\int_a^b f(t) dt$, 即

$$P(a \leq L \leq b) = \int_a^b f(t) dt \tag{4.2-6}$$

3 累积失效频率直方图

以失效时间 t 为横坐标, 以累积失效频率 F_i 为纵坐标, 作直方图, 得到累积失效频率直方图, 如图 4.2-3 所示。

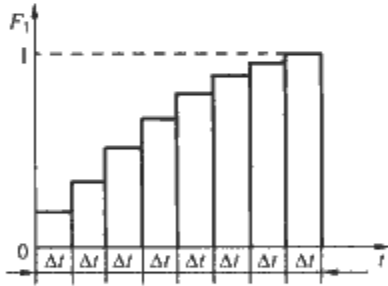


图 4.2-3 累积失效频率直方图

4 累积失效分布函数

如试验数据很多, 组距 Δt 取得越来越小(即分组数越来越多), 则累积失效频率直方图中各矩形右上角顶点之连线将趋近于一条光滑的曲线, 此曲线称为累积失效分布曲线, 如图 4.2-4 所示。其数学表达式 $F(t)$ 称为累积失效分布函数。

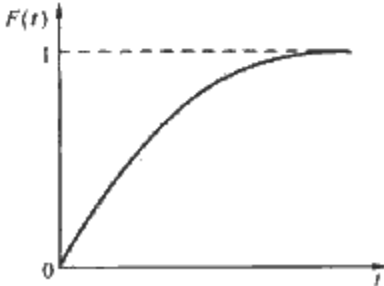


图 4.2-4 累积失效分布曲线

第3章 低压电器可靠性特征量

电器产品可分为不可修复产品和可修复产品两大类。不可修复产品是指不能修复或是虽能修复但不值得修复的产品,小容量交流接触器、小型中间继电器等小型电器产品均可看作不可修复产品。可修复产品是指可以修复的产品,低压断路器、高压断路器、成套装置等大型电器产品均可看作可修复产品。

1 不可修复产品的可靠性特征量

1.1 可靠度

可靠度是指产品在规定条件下和规定时间(或操作次数)内完成规定功能的概率。可靠度 R 是时间 t 的函数,一般用 $R(t)$ 表示,称为可靠度函数,用概率来表达可靠度函数,它是指产品寿命 L 这个随机变量不小于规定时间 t 的概率,即

$$R(t) = \begin{cases} P(L \geq t) & (t \geq 0) \\ 1 & (t < 0) \end{cases} \quad (4.3-1)$$

近似表达式为:取 n 个产品进行试验,若规定的时间 t 内共有 $m(t)$ 个产品失效(失效是指产品丧失规定的功能),则该产品的可靠度近似等于

$$R(t) \approx \frac{n - m(t)}{n} \quad (4.3-2)$$

取值范围为 $0 \sim 1$, 即 $0 \leq R(t) \leq 1$, $R(t)$ 随时间变化的曲线如图 4.3-1 所示。

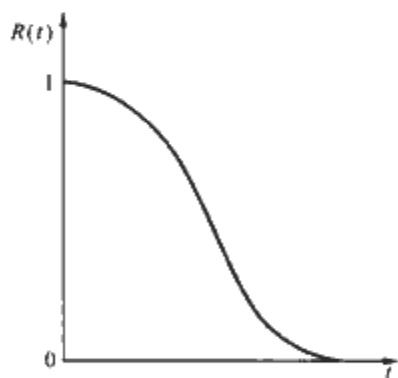


图 4.3-1 $R(t)$ 曲线

1.2 累积失效概率

累积失效概率是指产品在规定条件下和规定的时间(或操作次数)内丧失规定功能的概率。累积失效概率是时间 t 的函数,有时把它称作“不可靠函数”,用 $F(t)$ 表示。它是指产品寿命 L 这个随机变量小于规定时间 t 的概率,即

$$F(t) = \begin{cases} P(L < t) & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (4.3-3)$$

近似表达式为:如有 n 个产品进行寿命试验,试验到 t 瞬间的失效数为 $m(t)$,则当 n 足够大时,产品在 t 瞬间的累积失效概率近似等于

$$F(t) \approx \frac{m(t)}{n} \quad (4.3-4)$$

累积失效概率 $F(t)$ 是时间 t 的非减函数。其取值范围为 $0 \leq F(t) \leq 1$ 。

1.3 失效率

产品在任一瞬间 t 时的失效率是指产品工作到 t 时刻后的单位时间内发生失效的概率。失效率是时间 t 的函数,一般称为失效率函数,用 $\lambda(t)$ 来表示。

近似表达式为:设 n 个产品从 $t=0$ 开始工作,到 t 瞬间的失效数为 $m(t)$,而工作到 $t + \Delta t$ 瞬间的失效数为 $m(t + \Delta t)$,则失效率 $\lambda(t)$ 可用式 (4.3-5) 计算,即

$$\lambda(t) = \frac{m(t + \Delta t) - m(t)}{[n - m(t)] \Delta t} \quad (4.3-5)$$

失效率的单位是 h^{-1} 、 10^{-5}h^{-1} ($\%/10^3 \text{h}$)、 $1/\text{次}$ 、 $1/10 \text{次}$ 、 $\%/10^4 \text{次}$ 。

1.4 平均寿命

通俗地说,产品的平均寿命就是指一批产品寿命的平均值。严格说来,不可修复的产品的平均寿命是指产品发生失效前的平均工作时间(或平均操作次数),通常记作 MTTF (Mean Time To Failure)。

当需要了解一批产品的平均寿命时,把该批产品中各个产品寿命的全体看作一个总体。由于寿命试验具有破坏性,所以一般从这批产品中随机抽取 n 个产品进行寿命试验,并测得其寿命为 t_1, t_2, \dots, t_n ,这组寿命数据就构成了一个子样,此子样的平均寿命 \bar{t} 可由式 (4.3-6) 确定,即

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (4.3-6)$$

如果 n 很大,则用式 (4.3-6) 计算太繁琐,这时可按一定时间间隔(或操作次数)将 n 个寿命数据分成 k 组,并以每组的失效时间范围的中值作为该组中每个寿命数据的近似值。这时子样的平均寿命由式 (4.3-7) 计算,即

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k t_{xi} \Delta m_i \quad (4.3-7)$$

式中: Δm_i 为第 i 组的频数; t_{xi} 为第 i 组的失效时间范围的中值。

1.5 寿命标准离差

反映产品寿命离散程度的可靠性特征量就是寿命标准离差。

设一批产品寿命的子样为 t_1, t_2, \dots, t_n ,该子样的平均寿命为 \bar{t} ,子样的寿命方差为

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 \quad (4.3-8)$$

子样的寿命标准离差为

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (4.3-9)$$

如子样较大(即 n 较大)时,用式 (4.3-8) 及式 (4.3-9) 来计算子样的寿命方差 s^2 及寿命标准离差 s 相当繁琐。这时,可按一定时间间隔(或操作次数)将 n 个寿命数据分成 k 组,并以每组失效时间范围的中值作为该组中每个寿命数

据的近似值。则子样的寿命方差 s^2 及寿命标准离差 s 分别可用式 (4.3-10) 和式 (4.3-11) 计算, 即

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k \Delta m_i (t_{zi} - \bar{t})^2 \tag{4.3-10}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k \Delta m_i (t_{zi} - \bar{t})^2} \tag{4.3-11}$$

式中: Δm_i 为第 i 组的频数; t_{zi} 为第 i 组的失效时间范围的中值。

当子样逐渐变大 (n 逐渐增大) 时, 子样的寿命方差 s^2 及寿命标准离差 s 值虽有波动, 但总的趋势是分别趋向一个稳定值, 此稳定值即为总体的寿命方差及寿命标准离差。在实际工作中, 总体的寿命方差及寿命标准离差一般可以用子样的寿命方差及寿命标准离差来估计。

1.6 可靠寿命

可靠度函数 $R(t)$ 是产品工作时间 t 的函数。使产品的可靠度减小到给定值 R 时所需的工作时间就称为产品的可靠寿命, 以符号 t_R 表示, 即

$$R(t_R) = R \tag{4.3-12}$$

可靠寿命 t_R 与可靠度 R 间的关系也可用图形来表示, 如图 4.3-2 所示。

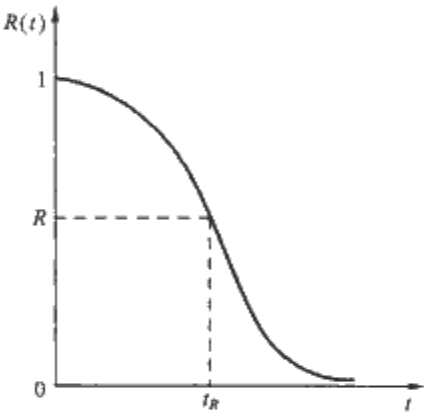


图 4.3-2 可靠寿命 t_R 与可靠度 R 间的关系

1.7 中位寿命

产品可靠度等于 0.5 时的可靠寿命称为中位寿命, 以符号 $t_{0.5}$ 表示。中位寿命的物理意义是一批产品失效一半所需的工作时间。中位寿命可用式 (4.3-13) 表示, 即

$$R(t_{0.5}) = 0.5 \tag{4.3-13}$$

1.8 成功率

成功率是指产品在规定的条件下完成规定功能的概率或是产品在规定的条件下试验成功的概率。

2 可修复产品的可靠性特征量

可修复产品的可靠性特征量主要有平均故障率、平均无故障工作时间、有效度、平均修复时间、维修费用率、可靠度及故障密度。

2.1 平均故障率 λ

考核设备的无故障性或故障发生的频繁程度是指在规定的条件下和规定的时间内, 产品的故障总数与试验总数之比。其观测值计算公式为

$$\lambda = \frac{v}{nt} \tag{4.3-14}$$

式中: n 为试验的样本数; t 为试验时间; v 为试验中发生的

故障数。

为了区分各类故障, 将各类故障 (致命故障、严重故障、轻微故障) 统一折为一般故障来统计, 用故障率 D 表示故障出现的频繁程度

$$D = K \frac{\sum_{i=1}^4 \epsilon_i v_i}{nt}$$

式中: v_i 为试样发生的第 i 类故障数; ϵ_i 为第 i 类故障的危害度系数 (推荐 $\epsilon_1=100$ 代表致命故障, $\epsilon_2=5$ 代表严重故障, $\epsilon_3=1$ 代表一般故障, $\epsilon_4=0.2$ 代表轻微故障); n 为试验的样本数; t 为试验时间; K 为可靠性试验时间系数。

2.2 平均无故障工作时间 MTBF

平均无故障工作时间 MTBF (Mean Time Between Failure) 主要考核设备的耐久性, 即在规定的条件下能维持规定功能的持续时间。其表达式为

$$MTBF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \tag{4.3-15}$$

式中: N 为参加试验的设备总数; T_i 为第 i 台设备的无故障工作时间。

如果设备由若干个不同的小的系统构成, 为统计计算方便起见, 对这些不同的系统可作为相同产品等效处理, 这样系统的平均无故障工作时间为

$$MTBF = \frac{NT}{v}$$

式中: T 为试验期间整个设备的工作时间; v 为试验期间内各系统的故障总数。

2.3 有效度 A

有效度 A 是对设备的整体评价, 是指在特定的时间内维持规定功能的概率。其表达式为

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N L_{wi}}{\sum_{i=1}^N (t_{wi} + t_{ri})} \tag{4.3-16}$$

式中: N 为参加试验的设备套数; t_{wi} 为试验期间第 i 套设备的工作时间; t_{ri} 为试验期间第 i 套设备的维修时间 (包括诊断、准备、维修、试运行时间)。

2.4 平均修复时间 MTTR

平均修复时间 MTTR (Mean Time To Repair) 主要用于考核、评定系统的维修性水平。其表达式为

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} \tag{4.3-17}$$

式中: N 为发生故障而被维修的系统总数; t_i 为修复第 i 个系统的时间。

2.5 修复率

修复率是修理时间已达到 t 的产品, 在该时间后的单位时间内完成修复的概率, 记作 $m(t)$ 。

2.6 可靠度 $R(t)$

可靠度 $R(t)$ (reliability at time t) 是设备在起始时刻正常工作的条件下, 在时间 $(0, t)$ 内不发生故障的概率。

2.7 故障密度 $f(t)$

故障密度 $f(t)$ (failure intensity) 是指设备在 $(t, t + \Delta t)$ 期间发生第一次故障的概率。

3 失效密度函数与可靠性特征量之间的关系

(1) 累积失效分布函数与累积失效概率是同一个函数, 因此均以 $F(t)$ 表示。

(2) 累积失效概率 $F(t)$ 与可靠度函数 $R(t)$ 间的关系为

$$F(t) = 1 - R(t) \tag{4.3-18}$$

(3) 累积失效分布函数 $F(t)$ 、可靠度函数 $R(t)$ 与失效密度函数 $f(t)$ 间的关系为

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \tag{4.3-19}$$

或

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = F'(t) \tag{4.3-20}$$

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^\infty f(t) dt \tag{4.3-21}$$

或

$$f(t) = \frac{d[1 - R(t)]}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} = -R'(t) \tag{4.3-22}$$

累积失效分布函数 $F(t)$ 、可靠度函数 $R(t)$ 与失效密度函数 $f(t)$ 间的关系可用图 4.3-3 表示。

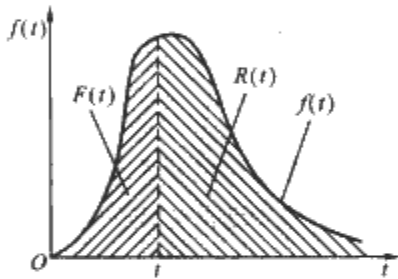


图 4.3-3 $F(t)$ 、 $R(t)$ 与失效密度函数 $f(t)$ 间的关系

(4) 可靠度函数 $R(t)$ 与失效率函数 $\lambda(t)$ 间的关系为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \tag{4.3-23}$$

或

$$\lambda(t) = -\frac{R'(t)}{R(t)} \tag{4.3-24}$$

或

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \tag{4.3-25}$$

(5) 累积失效分布函数 $F(t)$ 、失效密度函数 $f(t)$ 与失效率函数 $\lambda(t)$ 间的关系为

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \tag{4.3-26}$$

$$f(t) = \lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \tag{4.3-27}$$

(6) 总体的平均寿命 μ 与失效密度函数 $f(t)$ 间的关系为

$$\mu = \int_0^\infty t f(t) dt \tag{4.3-28}$$

(7) 总体的寿命方差 σ^2 与失效密度函数 $f(t)$ 间的关系为

$$\sigma^2 = \int_0^\infty (t - \mu)^2 f(t) dt \tag{4.3-29}$$

或

$$\sigma^2 = \int_0^\infty t^2 f(t) dt - \mu^2 \tag{4.3-30}$$

总体的寿命标准离差 σ 与失效密度函数 $f(t)$ 的关系为

$$\sigma = \sqrt{\int_0^\infty (t - \mu)^2 f(t) dt} \tag{4.3-31}$$

或

$$\sigma = \sqrt{\int_0^\infty t^2 f(t) dt - \mu^2} \tag{4.3-32}$$

可将上述各可靠性特征量的数学表达式, 还有可靠性特征量之间, 以及它们与失效密度函数 $f(t)$ 之间的相互关系归纳列表, 见表 4.3-1。

表 4.3-1 可靠性特征量的数学表达式及相互关系

可靠性特征量的名称和符号	数学表达式	相互关系
累积失效概率 $F(t)$	$F(t) = \begin{cases} P(L < t) & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases}$	$F(t) = \int_0^t f(t) dt$ $f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = F'(t)$
可靠度函数 $R(t)$	$R(t) = \begin{cases} P(L \geq t) & (t \geq 0) \\ 1 & (t < 0) \end{cases}$	$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^\infty f(t) dt$ $R(t) = 1 - F(t)$ $f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} = -R'(t)$
失效率函数 $\lambda(t)$	$\lambda(t) = \frac{m(t + \Delta t) - m(t)}{[n - m(t)] \Delta t}$	$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$ $\lambda(t) = -\frac{R'(t)}{R(t)}$ $R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$ $F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$ $f(t) = \lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$
子样平均寿命 \bar{t} 总体平均寿命 μ	$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$ $\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k t_{xi} \Delta m_i$	$\mu = \int_0^\infty t f(t) dt$
子样寿命标准离差 S 总体寿命标准离差 σ	$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}$ $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k \Delta m_i (t_{xi} - \bar{t})^2}$	$\sigma = \sqrt{\int_0^\infty (t - \mu)^2 f(t) dt}$ $\sigma = \sqrt{\int_0^\infty t^2 f(t) dt - \mu^2}$
可靠寿命 t_R	$R(t_R) = R$	
中位寿命 $t_{0.5}$	$R(t_{0.5}) = 0.5$	

4 失效分布类型

4.1 常见的失效分布类型

某一随机变量的分布类型就是指该随机变量的密度函数或累积分布函数的函数类型。指数分布是可靠性理论中最常见的分布类型。此外, 常见的失效分布类型还有威布尔分布、正态分布、对数正态分布等。

4.1.1 指数分布

指数分布 (特别是单参数指数分布) 在可靠性技术中具有十分重要的地位。这一方面是因为有很多产品的寿命都服从指数分布, 另一方面是因为指数分布时平均寿命及失效率等可靠性特征量可用简单而精确的公式计算, 使用比较方便。因此, 目前许多国家所制定的标准中, 绝大多数都以指数分布为基础对电子元器件产品的可靠性等级进行鉴定。我国制定的 GB/T 15510—1995 中可靠性等级的鉴定试验抽样表, 也都是在寿命服从单参数指数分布的条件下得出的。

指数分布可分为单参数指数分布和双参数指数分布。其中, 单参数指数分布即为目前一般资料中所指的指数分布, 它只有一个参数, 它是双参数指数分布的特殊情况, 所以也可将双参数指数分布称为普遍形式的指数分布。

4.1.1.1 单参数指数分布

4.1.1.1.1 单参数指数分布的定义

若 L (它表示随机变量“产品寿命”) 的密度函数即失效密度函数为

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t} & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (4.3-33)$$

则称随机变量 L 服从单参数指数分布。式中参数 λ 表示单参数指数分布时的失效率。

其累积失效分布函数为

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t} & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (4.3-34)$$

单参数指数分布的失效密度函数 $f(t)$ 和累积失效分布函数 $F(t)$ 分别如图 4.3-4 和图 4.3-5 所示。

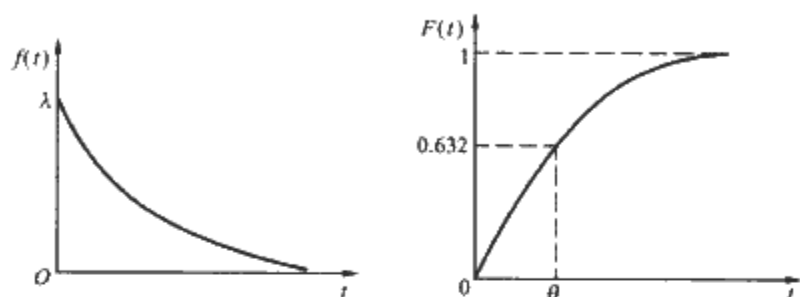


图 4.3-4 单参数指数分布的失效密度函数

图 4.3-5 单参数指数分布的累积失效分布函数

4.1.1.1.2 单参数指数分布的可靠性特征量

(1) 可靠度函数 $R(t)$ 为

$$R(t) = 1 - F(t) = \begin{cases} e^{-\lambda t} & (t \geq 0) \\ 1 & (t < 0) \end{cases} \quad (4.3-35)$$

单参数指数分布的可靠度函数如图 4.3-6 所示。

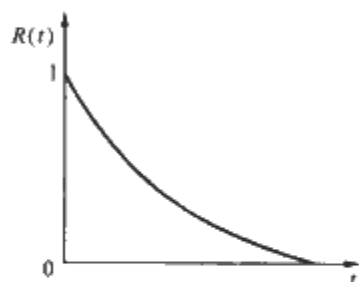


图 4.3-6 单参数指数分布的可靠度函数

(2) 失效率函数 $\lambda(t)$ 为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \begin{cases} \lambda & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (4.3-36)$$

(3) 平均寿命 θ (指数分布时, 平均寿命常用 θ 表示) 为

$$\theta = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \frac{1}{\lambda} \quad (4.3-37)$$

(4) 寿命方差 σ^2 与寿命标准离差 σ 为

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt - \mu^2 = \theta^2 \quad (4.3-38)$$

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} = \theta \quad (4.3-39)$$

(5) 可靠寿命 t_R 为

$$t_R = -\frac{1}{\lambda} \ln R = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{R} \quad (4.3-40)$$

(6) 中位寿命 $t_{0.5}$ 为

$$t_{0.5} = -\frac{1}{\lambda} \ln 0.5 = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} = 0.693\theta \quad (4.3-41)$$

4.1.1.1.3 单参数指数分布的特点

(1) 如果产品寿命服从单参数指数分布, 则其失效率函数等于一个常数 λ ; 反之, 如果已知 $t \geq 0$ 时产品的失效率为一个常数 λ , 则产品寿命必然服从单参数指数分布。

(2) 当产品寿命服从单参数指数分布时, 其平均寿命 θ 与失效率 λ 互为倒数。

(3) 当产品寿命服从单参数指数分布时, 其寿命标准离差 σ 等于平均寿命 θ , 且与失效率 λ 互为倒数。

4.1.1.2 双参数指数分布

4.1.1.2.1 双参数指数分布的定义

若随机变量 L 的密度函数为

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda(t-\gamma)} & (t \geq \gamma \geq 0) \\ 0 & (t < \gamma) \end{cases} \quad (4.3-42)$$

则称随机变量 L 服从双参数指数分布。

其累积失效分布函数为

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda(t-\gamma)} & (t \geq \gamma \geq 0) \\ 0 & (t < \gamma) \end{cases} \quad (4.3-43)$$

式中: λ 为失效率; γ 为位置参数, 它表示在 $t < \gamma$ 时, 产品不发生失效。

单参数指数分布是双参数指数分布当 $\gamma=0$ 时的特例。因此, 也可把双参数指数分布称为普遍形式的指数分布。

双参数指数分布的失效密度函数和累积失效分布函数分别如图 4.3-7 和图 4.3-8 所示。

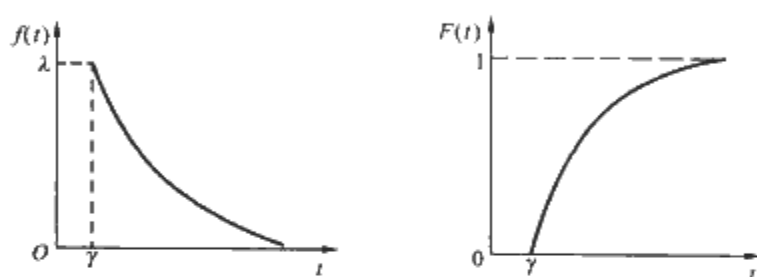


图 4.3-7 双参数指数分布的失效密度函数

图 4.3-8 双参数指数分布的累积失效分布函数

4.1.1.2.2 双参数指数分布的可靠性特征量

(1) 可靠度函数 $R(t)$ 的表达式为

$$R(t) = 1 - F(t) = \begin{cases} e^{-\lambda(t-\gamma)} & (t \geq \gamma \geq 0) \\ 1 & (t < \gamma) \end{cases} \quad (4.3-44)$$

双参数指数分布的可靠度函数如图 4.3-9 所示。

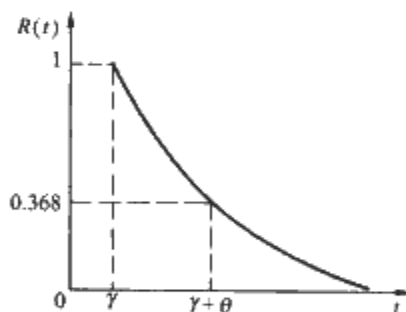


图 4.3-9 双参数指数分布的可靠度函数

(2) 失效率函数 $\lambda(t)$ 为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \begin{cases} \lambda & (t \geq \gamma \geq 0) \\ 0 & (t < \gamma) \end{cases} \quad (4.3-45)$$

(3) 平均寿命 θ 为

$$\theta = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda(t-\gamma)} dt = \frac{1}{\lambda} + \gamma \quad (4.3-46)$$

(4) 寿命方差 σ^2 和寿命标准离差 σ 为

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} t^2 \lambda e^{-\lambda(t-\gamma)} dt - \theta^2 = \frac{1}{\lambda^2} = (\theta - \gamma)^2 \quad (4.3-47)$$

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} = \theta - \gamma \quad (4.3-48)$$

(5) 可靠寿命 t_R

$$t_R = \gamma - \frac{\ln R}{\lambda} = \gamma + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{R} \quad (4.3-49)$$

(6) 中位寿命 $t_{0.5}$

$$t_{0.5} = \gamma - \frac{\ln 0.5}{\lambda} = \gamma + \frac{\ln 2}{\lambda} = 0.307\gamma + 0.693\theta \quad (4.3-50)$$

4.1.1.2.3 双参数指数分布的特点

(1) 如果产品寿命服从双参数指数分布, 则在 $t \geq \gamma \geq 0$ 时其失效率函数等于常数 λ , 而在 $t < \gamma$ 时失效率函数等于零。反之, 如果 $t \geq \gamma \geq 0$ 时产品的失效率等于常数 λ , 而 $t < \gamma$ 时失效率等于零, 则产品寿命必然服从双参数指数分布。

(2) 当产品寿命服从双参数指数分布时, 其平均寿命 θ 与失效率 λ 不再互为倒数, 而应是 $\theta = \frac{1}{\lambda} + \gamma$ 。

(3) 当产品寿命服从双参数指数分布时, 其寿命标准离差 σ 与失效率 λ 仍互为倒数, 但 σ 与平均寿命 θ 不再相等, 而应是 $\sigma = \theta - \gamma$ 。

4.1.2 威布尔分布

威布尔分布是可靠性理论中常用的最复杂的一种分布。它是由瑞典人威布尔首先提出的, 所以称为威布尔分布。威布尔分布具有三个参数, 所以它的适应能力强, 亦即对各种类型的试验数据拟合的能力强。因此, 它在可靠性技术中用得较广。

4.1.2.1 威布尔分布的定义

若随机变量 L 的密度函数即失效密度函数为

$$f(t) = \begin{cases} \frac{m}{t_0} (t - \gamma)^{m-1} e^{-\frac{(t-\gamma)^m}{t_0}} & (t \geq \gamma) \\ 0 & (t < \gamma) \end{cases} \quad (4.3-51)$$

则称随机变量 L 服从威布尔分布。

其累积失效分布函数为

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\frac{(t-\gamma)^m}{t_0}} & (t \geq \gamma) \\ 0 & (t < \gamma) \end{cases} \quad (4.3-52)$$

式中: m 为形状参数; t_0 为尺度参数; γ 为位置参数。

4.1.2.2 威布尔分布的三个参数 (m, t_0, γ) 的意义

(1) 形状参数 m 。威布尔分布的失效密度曲线、可靠度曲线、累积失效分布曲线及失效率曲线的形状都随 m 值不同而不同, 所以把 m 称为形状参数。其中受 m 值影响最显著的是失效密度曲线。当位置参数 γ 和尺度参数 t_0 固定 (例如取 $\gamma=0, t_0=1$) 时, 不同 m 值的失效密度曲线如图 4.3-10 所示。

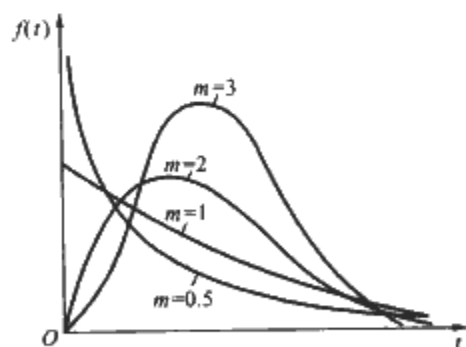


图 4.3-10 $\gamma=0, t_0=1$ 时不同 m 值的失效密度曲线

从图 4.3-10 中可看出, 不同 m 值的失效密度曲线大致可分为以下三个类型:

1) 当 $m < 1$ 时, $f(t)$ 曲线随时间单调下降, 且 $f(t)$ 曲线与纵轴不相交 (以纵轴为渐近线)。

2) 当 $m = 1$ 时, $f(t)$ 曲线为指数曲线, 它与纵轴相交且随时间单调下降。

3) 当 $m > 1$ 时, $f(t)$ 曲线随时间增加而出现峰值, 然后下降并逐渐趋近于零, $f(t)$ 曲线都呈单峰形。

(2) 位置参数 γ 。当 m 及 t_0 固定不变 (例如取 $t_0=1, m=2$) 时, γ 取不同值时的失效密度曲线如图 4.3-11 所示。

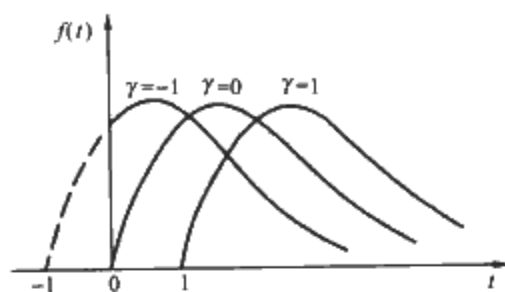


图 4.3-11 $t_0=1, m=2$ 时不同 γ 值的失效密度曲线

从图 4.3-11 中可看出, 不同 γ 值的失效密度曲线的形状完全相同, 只是在坐标系中的位置有所不同。

当 $\gamma < 0$ 时, $f(t)$ 曲线由 $\gamma=0$ 时的位置向左平行移动 $|\gamma|$ 的距离; 当 $\gamma > 0$ 时, $f(t)$ 曲线由 $\gamma=0$ 时的位置向右平行移动 $|\gamma|$ 的距离。故 γ 称为位置参数。

(3) 尺度参数 t_0 。当 m 及 γ 固定不变, t_0 不同时, 威布尔分布的失效密度曲线的高度及宽度均不相同。图 4.3-12 为 $m=2, \gamma=0$ 时不同 t_0 值的失效密度曲线。由图 4.3-12 可见, 当 t_0 值增大时, 失效密度曲线的高度变小而宽度变大。

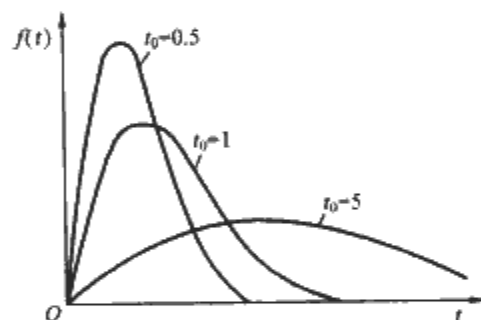


图 4.3-12 $m=2, \gamma=0$ 时不同 t_0 值的失效密度曲线

真尺度参数 η 为

$$\eta = t_0^{\frac{1}{m}} \quad (4.3-53)$$

当 $\gamma=0$ 时可得

$$\eta f(t) = \begin{cases} m t'^{m-1} e^{-t'^m} & (t' \geq 0) \\ 0 & (t' < 0) \end{cases} \quad (4.3-54)$$

式中 $t' = t/\eta$, 即当 m 及 γ 值相同而 η 值不同时, 只要把纵坐标和横坐标的比例尺作适当改变 (纵坐标的比例尺放大 η 倍, 横坐标的比例尺缩小 η 倍), 它们的失效密度曲线就完全重合了。因此, 称 η 为真尺度参数 (η 也称特征寿命)。

4.1.2.3 威布尔分布时的可靠性特征量

(1) 可靠度函数 $R(t)$ 为

$$R(t) = 1 - F(t) = \begin{cases} e^{-\frac{(t-\gamma)^m}{t_0}} & (t \geq \gamma) \\ 1 & (t < \gamma) \end{cases} \quad (4.3-55)$$

$t_0=1, \gamma=1$ 不同 m 值时的可靠度曲线如图 4.3-13 所示。

(2) 失效率函数 $\lambda(t)$ 为

当 $t \geq \gamma$ 时

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{m}{t_0} (t - \gamma)^{m-1} e^{-\frac{(t-\gamma)^m}{t_0}}}{e^{-\frac{(t-\gamma)^m}{t_0}}} = \frac{m}{t_0} (t - \gamma)^{m-1}$$

所以威布尔分布时的失效率函数为

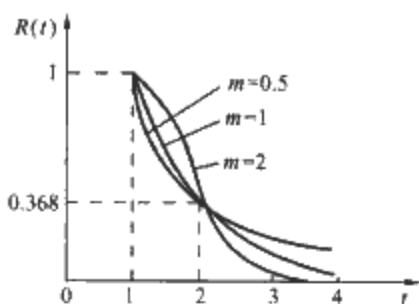


图 4.3-13 $t_0=1, \gamma=1$ 时不同 m 值的可靠度曲线

$$\lambda(t) = \begin{cases} \frac{m}{t_0} (t - \gamma)^{m-1} & (t \geq \gamma) \\ 0 & (t < \gamma) \end{cases} \quad (4.3-56)$$

不同 m 值时的失效率曲线如图 4.3-14 所示。

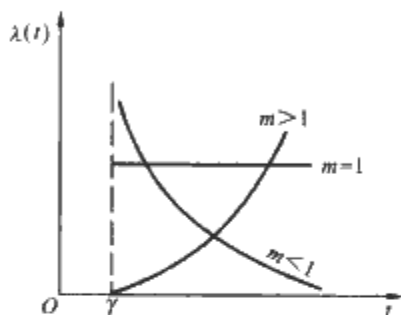


图 4.3-14 不同 m 值时的失效率曲线

(3) 平均寿命为

$$\mu = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) + \gamma \quad (4.3-57)$$

式中: $\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)$ 可根据 m 值由数学手册中的伽马函数表查得

$\left[\int_0^\infty x^{p-1} e^{-x} dx (p > 0)\right]$ 称为伽马函数, 以符号 $\Gamma(P)$ 表示。

但伽马函数表中一般只列出 P 为 1~2 范围内的 $\Gamma(P)$ 值, 当 $\left(1 + \frac{1}{m}\right) > 2$ 时, 可利用伽马函数的下列性质来求 $\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)$, 即

$$\Gamma(P+1) = P\Gamma(P) \quad (P > 0) \quad (4.3-58)$$

(4) 寿命标准离差 σ 为

$$\sigma^2 = \eta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right] \quad (4.3-59)$$

$$\sigma = \eta \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.3-60)$$

式中: $\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right)$ 表示 $\left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)\right]^2$; $\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right)$ 可根据 m 值由伽马函数表求得。

为了使用方便, 将不同 m 值时的 $\Gamma(1 + 1/m)$ 及 $\Gamma(1 + 2/m)$ 列表, 如附录 A 所示。

(5) 可靠寿命 t_R 为

$$t_R = \gamma + \eta (-\ln R)^{\frac{1}{m}} \quad (4.3-61)$$

(6) 中位寿命 $t_{0.5}$ 为

$$t_{0.5} = \gamma + \eta (-\ln 0.5)^{\frac{1}{m}} = \gamma + \eta (\ln 2)^{\frac{1}{m}} = \gamma + \eta (0.693)^{\frac{1}{m}} \quad (4.3-62)$$

4.1.2.4 威布尔分布的特点

(1) 威布尔分布可分为两类: $\gamma=0$ 时的威布尔分布称为两参数威布尔分布; $\gamma \neq 0$ 时的威布尔分布称为三参数威布尔分布。

(2) 当形状参数 $m=1$ 时, 三参数威布尔分布的失效密

度函数变为

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{t_0} e^{-\frac{t-\gamma}{t_0}} & (t \geq \gamma) \\ 0 & (t < \gamma) \end{cases} \quad (4.3-63)$$

即双参数指数分布是三参数威布尔分布的特殊情况。

(3) 当形状参数 m 为 3~4 时, 威布尔分布的失效密度曲线与正态分布的失效密度曲线接近于重合, 如图 4.3-15 所示。图 4.3-15 中虚线是正态分布的失效密度曲线 (其平均寿命 $\mu=0.8963$, 寿命标准离差 $\sigma=0.303$), 实线是威布尔分布的失效密度曲线 (其参数为 $m=3.25, \eta=1, \gamma=0$)。

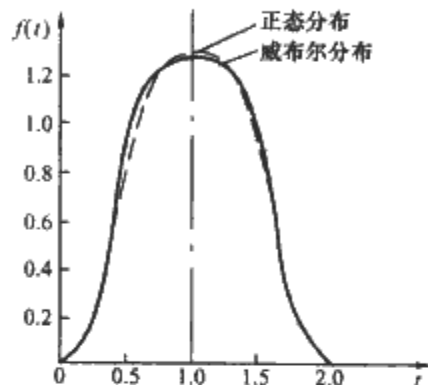


图 4.3-15 威布尔分布与正态分布的比较

4.1.3 正态分布

在可靠性技术中经常用到正态分布, 大多用它来描述产品由于耗损或退化而产生的失效。

4.1.3.1 正态分布的定义

若随机变量 X 的密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (-\infty < x < \infty) \quad (4.3-64)$$

式中: μ 为正态分布的位置参数; σ 为正态分布的尺度参数。则随机变量 X 服从参数为 μ 和 σ 的正态分布, 记为 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。

正态分布的累积分布函数为

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(v-\mu)^2}{2\sigma^2}} dv \quad (-\infty < x < \infty) \quad (4.3-65)$$

正态分布的密度曲线如图 4.3-16 所示。

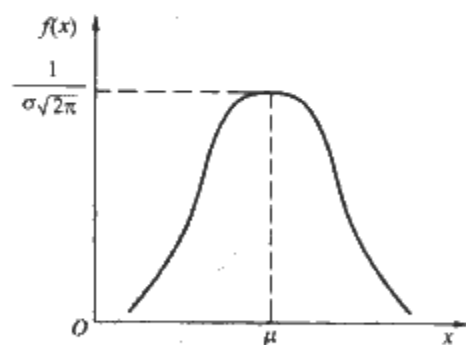


图 4.3-16 正态分布的密度曲线

4.1.3.2 正态分布两个参数 μ 及 σ 的意义

(1) 位置参数 μ 。当随机变量 X 服从正态分布时, X 的均值 $E(X)$ 等于

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx = \mu \quad (4.3-66)$$

所以正态分布的位置参数 μ 就是随机变量 X 的均值。当随机变量为寿命时, 位置参数 μ 就是平均寿命, 表示正态分布的中心位置。

(2) 尺度参数 σ 。当随机变量 X 服从正态分布时, X 的方差 $D(X)$ 等于

$$D(X) = \int_{-\infty}^{\infty} (x-\mu)^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx = \sigma^2 \quad (4.3-67)$$

$$\sqrt{D(X)} = \sigma \quad (4.3-68)$$

所以正态分布的尺度参数 σ 就是随机变量 X 的标准离差。当随机变量为寿命时, 尺度参数 σ 就是寿命标准离差。

位置参数 μ 相同而尺度参数 σ 不同的三个正态分布的密度函数曲线如图 4.3-17 所示。

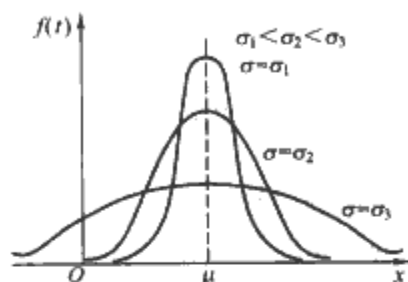


图 4.3-17 μ 相同尺度参数 σ 不同的三个正态分布的密度函数曲线

4.1.3.3 正态分布的特点

(1) 正态分布的密度曲线呈钟形, 并对称于直线 $x=\mu$ 。

(2) 位置参数 μ 就是随机变量 X 的均值, 它表示正态分布密度曲线的中心位置。尺度参数 σ 就是随机变量 X 的标准离差, 它反映了正态分布的离散程度。

(3) 在 $x=\mu$ 时, 密度函数 $f(x)$ 取得极大值 $\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$, 故当随机变量 X 越靠近 μ 时, 其取值的概率越大, 反之, 当随机变量 X 的取值越远离 μ 时, 其概率越小。

(4) $\mu=0, \sigma=1$ 时的正态分布称为标准正态分布, 其密度函数及累积分布函数习惯用 $\varphi(z)$ 及 $\Phi(z)$ 表示, 即

$$\varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (-\infty < z < \infty) \quad (4.3-69)$$

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{v^2}{2}} dv \quad (-\infty < z < \infty) \quad (4.3-70)$$

式中: v 为变量符号。

标准正态分布一般记作 $N(0, 1)$, 其密度曲线如图 4.3-18 所示。

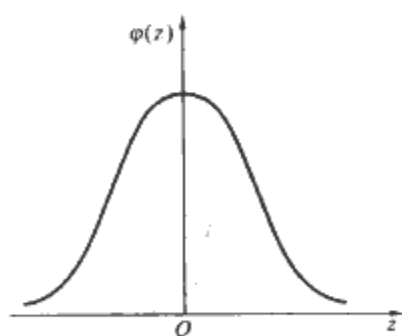


图 4.3-18 标准正态分布的密度曲线

4.1.3.4 分位数的概念

设随机变量 Z 服从标准正态分布 $N(0, 1)$, 若 u_p 满足以下条件

$$\Phi(u_p) = \int_{-\infty}^{u_p} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = p \quad (4.3-71)$$

则称 u_p 为标准正态分布的下侧分位数。

同样, 设随机变量 X 服从参数为 μ, σ 的正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 若 t_p 满足以下条件

$$F(t_p) = \int_{-\infty}^{t_p} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx = p \quad (4.3-72)$$

则称 t_p 为参数 μ 和 σ 的正态分布的下侧分位数。

标准正态分布的下侧分位数 u_p 与 p 间的关系, 以及参数为 μ 和 σ 的正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 的下侧分位数 t_p 与 p 间的关系可分别用图 4.3-19 和图 4.3-20 表示。

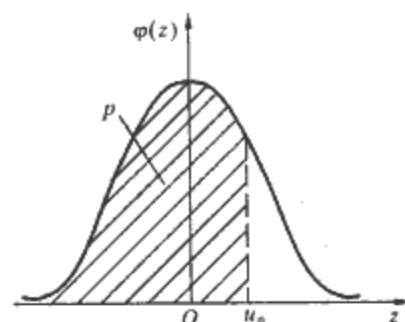


图 4.3-19 标准正态分布的下侧分位数 u_p 与 p 间的关系

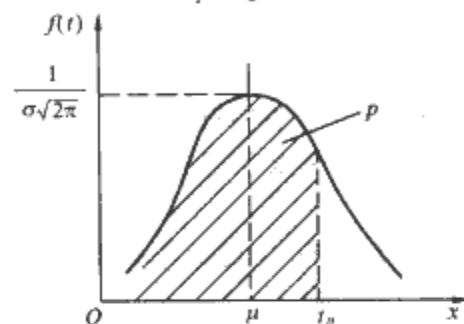


图 4.3-20 正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 的下侧分位数 t_p 与 p 间的关系

t_p 与 u_p 之间有如下关系

$$\left. \begin{aligned} u_p &= \frac{t_p - \mu}{\sigma} \\ t_p &= \sigma u_p + \mu \end{aligned} \right\} \quad (4.3-73)$$

例如: 设随机变量 X 服从参数为 μ 和 σ 的正态分布, 求 X 落在区间 $(\mu, \mu+\sigma)$ 内的概率 $P(\mu \leq X \leq \mu+\sigma)$ 。

解: 根据密度函数的性质可得

$$P(\mu \leq X \leq \mu+\sigma) = \int_{\mu}^{\mu+\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (4.3-74)$$

$$\text{如果令} \quad \mu = t_{p_1} \quad (4.3-75)$$

$$\mu + \sigma = t_{p_2} \quad (4.3-76)$$

式中: t_{p_1} 和 t_{p_2} 分别为对应于 p_1 和 p_2 的正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 的下侧分位数。

则将式 (4.3-75) 及式 (4.3-76) 代入式 (4.3-74) 可得

$$\begin{aligned} P(\mu \leq X \leq \mu+\sigma) &= \int_{t_{p_1}}^{t_{p_2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \\ &= \int_{-\infty}^{t_{p_2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx - \int_{-\infty}^{t_{p_1}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (4.3-77) \\ &= p_2 - p_1 \end{aligned}$$

再将式 (4.3-75) 代入式 (4.3-73) 可得与 t_{p_1} 相对应的 u_{p_1} , 即

$$u_{p_1} = \frac{t_{p_1} - \mu}{\sigma} = \frac{\mu - \mu}{\sigma} = 0$$

将式 (4.3-76) 代入式 (4.3-73) 可得与 t_{p_2} 相对应的 u_{p_2}

$$u_{p_2} = \frac{t_{p_2} - \mu}{\sigma} = \frac{\mu + \sigma - \mu}{\sigma} = 1$$

根据 $u_{p_1} = 0$ 及 $u_{p_2} = 1$ 在附录 B 中查得 $p_1 = 0.5$, $p_2 = 0.8413$, 将其代入式 (4.3-77) 可得所求概率值, 即 $P(\mu \leq X \leq \mu+\sigma) = 0.8413 - 0.5 = 0.3413 = 34.13\%$

正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 各部分面积所占的百分比如图 4.3-21 所示。

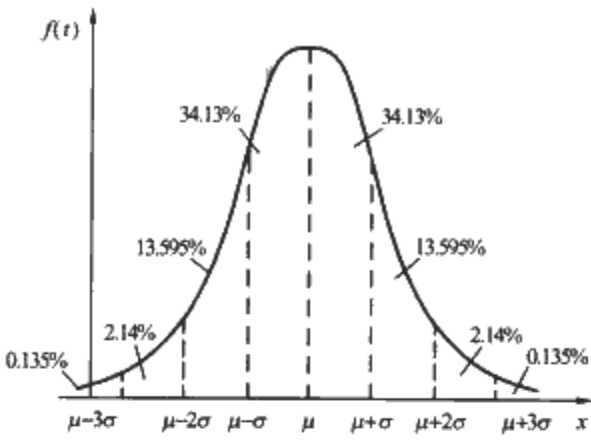


图 4.3-21 正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 各部分面积所占的百分比

4.1.3.5 正态分布的可靠性特征量

利用分位数的概念来求正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 的各可靠性特征量。

(1) 工作到给定时间 (或操作次数) t_{gd} 时的可靠度 $R(t_{gd})$ 。令 $t_{gd} = t_{p_1}$, 则

$$R(t_{gd}) = 1 - F(t_{gd}) = 1 - F(t_{p_1}) = 1 - p_1 \quad (4.3-78)$$

其中

$$u_{p_1} = \frac{t_{p_1} - \mu}{\sigma} = \frac{t_{gd} - \mu}{\sigma} \quad (4.3-79)$$

再由 u_{p_1} 值查附录 B 可得到 p_1 值。

(2) 工作到给定时间 (或操作次数) t_{gd} 时的失效率 $\lambda(t_{gd})$, 即

$$\lambda(t_{gd}) = \frac{f(t_{gd})}{R(t_{gd})} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t_{gd}-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{R(t_{gd})} \quad (4.3-80)$$

(3) 可靠寿命 t_R , 即

$$t_R = \mu + \sigma u_{1-R} \quad (4.3-81)$$

式中: R 为给定的可靠度; u_{1-R} 为 $p=1-R$ 时标准正态分布 $N(0, 1)$ 的下侧分位数。

即根据给定的可靠度 R 值算出 p 值 ($p=1-R$), 由该 p 值查附录 B 可得对应的 u_p (即 u_{1-R}) 值。

(4) 中位寿命 $t_{0.5}$, 即

$$t_{0.5} = \mu + \sigma u_{0.5} = \mu \quad (4.3-82)$$

这说明正态分布时中位寿命 $t_{0.5}$ 等于平均寿命 μ , 这也是正态分布的一个特点。

现将上述几种失效分布类型的失效密度函数及可靠度函数图形归纳列于表 4.3-2。

表 4.3-2 常用的几种失效分布类型的失效密度函数及可靠度函数

分布类型	失效密度函数	可靠度函数
单参数指数分布		
双参数指数分布		
威布尔分布		
正态分布		

4.2 失效分布类型的估计方法

若产品有以往的经验资料, 则可根据此来假设其失效分布类型, 若没有这方面的经验资料, 则一般可抽取一定数量的

样品进行寿命试验, 从所得到的试验数据绘制失效频率直方图或可靠度函数图形, 并将这些图形与表 4.3-2 中各种常用的失效分布类型的失效密度函数图形或可靠度函数图形进行比较, 从而对其失效分布类型作出估计。

4.2.1 大子样时失效分布类型的估计方法

所谓大子样即寿命试验数据个数较多。这时寿命数据应按一定时间间隔（或操作次数）分组，其步骤如下：

（1）将寿命数据分成 k 组， k 可由式（4.2-1）确定。

（2）计算各组频数 Δm_i 及频率 f_i^* ($f_i^* = \frac{\Delta m_i}{n}$) 并列表，见表 4.3-3。

表 4.3-3 寿命数据的分组统计

组号 i	寿命范围	频数 Δm_i	频率 f_i^*
1	$a_0 \sim a_1$	Δm_1	f_1^*
2	$a_1 \sim a_2$	Δm_2	f_2^*
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
k	$a_{k-1} \sim a_k$	Δm_k	f_k^*

（3）按表 4.3-3 数据绘制失效频率直方图。

（4）按失效频率直方图的形状大致绘出失效密度曲线。

（5）将绘出的失效密度曲线形状与表 4.3-2 中各种分布类型的失效密度曲线形状进行比较，并对产品的失效分布类型作出估计。

4.2.2 小子样时失效分布类型的估计方法

小子样时寿命试验数据较少，这时采用绘制可靠度曲线的方法来估计失效分布类型，其具体步骤如下：

（1）计算 $t=t_i$ 时的可靠度函数值 $R(t_i)$ ，当试验样品数 $n > 20$ 时

$$R(t_i) = 1 - \frac{i}{n} \quad (4.3-83)$$

$$\text{当 } n \leq 20 \text{ 时} \quad R(t_i) = 1 - \frac{i - 0.5}{n} \quad (4.3-84)$$

$$\text{或} \quad R(t_i) = 1 - \frac{i}{n + 1} \quad (4.3-85)$$

$$\text{或} \quad R(t_i) = 1 - \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (4.3-86)$$

式中： t_i 表示第 i 个失效产品的寿命数据 ($i = 1, 2, \dots, r$)。

（2）将 $i, t_i, R(t_i)$ 列表，如表 4.3-4 所示。

表 4.3-4 可靠度函数值

i	1	2	...	r
t_i	t_1	t_2	...	t_r
$R(t_i)$	$R(t_1)$	$R(t_2)$...	$R(t_r)$

（3）根据 $[t_i, R(t_i)]$ 在直角坐标系中描点，并绘出可靠度函数图形。

（4）将所绘出的可靠度函数图形与表 4.3-2 中各种失效分布类型的可靠度曲线形状进行比较，并对产品的失效分布类型作出估计。

4.3 失效分布类型的检验方法

4.3.1 失效分布类型的图检验方法

用上述方法已对产品的失效分布类型作出估计（假设），则可用图检验法来检验所作的假设是否正确。若假设失效分布类型为指数分布，则使用单边对数坐标纸检验；若假设失效分布类型为威布尔分布，则使用威布尔概率纸进行检验；若假设失效分布类型为正态分布，则使用正态概率纸检验。

4.3.1.1 用单边对数坐标纸检验失效分布类型是否为指数

分布

（1）单边对数坐标纸。当寿命服从单参数指数分布时，以 $\ln R(t)$ 为纵坐标， t 为横坐标，就构成了一个均匀刻度的直角坐标系。若在纵坐标上按 $R(t) = e^{\ln R(t)}$ 的关系再刻上 $R(t)$ 坐标，则就构成了单边对数坐标纸。 $R(t)$ 坐标是刻度不均匀的对数坐标，而 $\ln R(t)$ 坐标及 t 坐标都是均匀刻度的。实际的单边对数坐标纸的纵坐标没有刻上均匀刻度，只按对数关系刻度，而横坐标则为均匀刻度，如图 4.3-22 所示。

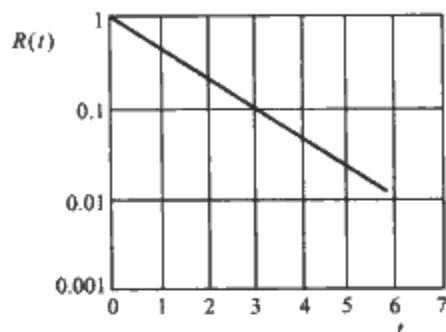


图 4.3-22 单边对数坐标纸

（2）图检验方法。若根据寿命试验数据，在单边对数坐标纸上按 $[t_i, R(t_i)]$ 在 $t-R(t)$ 坐标系中所描各点近似在通过 $[t=0, R(t)=1]$ 这点的一条直线上，则可判断失效分布类型为单参数指数分布。

若根据寿命试验数据在单边对数坐标纸上按 $[t_i, R(t_i)]$ 在 $t-R(t)$ 坐标系中所描各点近似在一条直线（此直线不通过 $[t=0, R(t)=1]$ 这一点）上，则可判断失效分布类型为双参数指数分布。

4.3.1.2 用威布尔概率纸检验失效分布类型是否为威布尔分布

（1）威布尔概率纸的结构原理。令

$$\left. \begin{aligned} \ln \ln \frac{1}{1-F(t)} &= Y \\ \ln t &= X \\ \ln t_0 &= B \end{aligned} \right\} \quad (4.3-87)$$

则

$$\left. \begin{aligned} t &= e^X \\ F(t) &= 1 - e^{-e^Y} \\ t_0 &= e^B \end{aligned} \right\} \quad (4.3-88)$$

在普通直角坐标系中以 X 为横坐标， Y 为纵坐标，同时按式（4.3-88）所示关系在横坐标上再标上 t 坐标，在纵坐标上再标上 $F(t)$ 坐标，就构成了威布尔概率纸的原理图，如图 4.3-23 所示。

在图 4.3-23 中， $F(t)$ 坐标和 t 坐标都是不均匀刻度的。为了实际使用方便，一般把图 4.3-23 中纵轴及横轴上的四个坐标尺 $[F(t)$ 尺、 Y 尺、 X 尺、 t 尺] 分别标在威布尔概率纸的左、右、上、下四边，就构成了通常所用的威布尔概率纸，如图 4.3-24 所示，图 4.3-24 中 $X = 1, Y = 0$ 的这一点称为 m 的估计点。

（2）失效分布类型为 $\gamma=0$ 的威布尔分布（两参数威布尔分布）的图检验法步骤。

1) 根据寿命试验数据 (t_1, t_2, \dots, t_n) 及试品总数 n ，用下列公式计算累积失效概率 $F(t_i)$ 。

$$\text{当 } n > 20 \text{ 时} \quad F(t_i) = \frac{i}{n} \quad (4.3-89)$$

$$\text{当 } n \leq 20 \text{ 时} \quad F(t_i) = \frac{i - 0.5}{n} \quad (4.3-90)$$

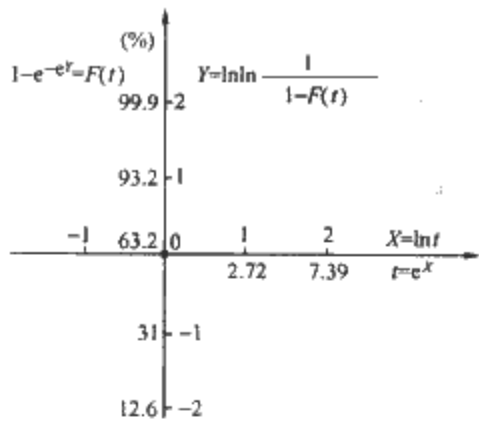


图 4.3-23 威布尔概率纸的原理图

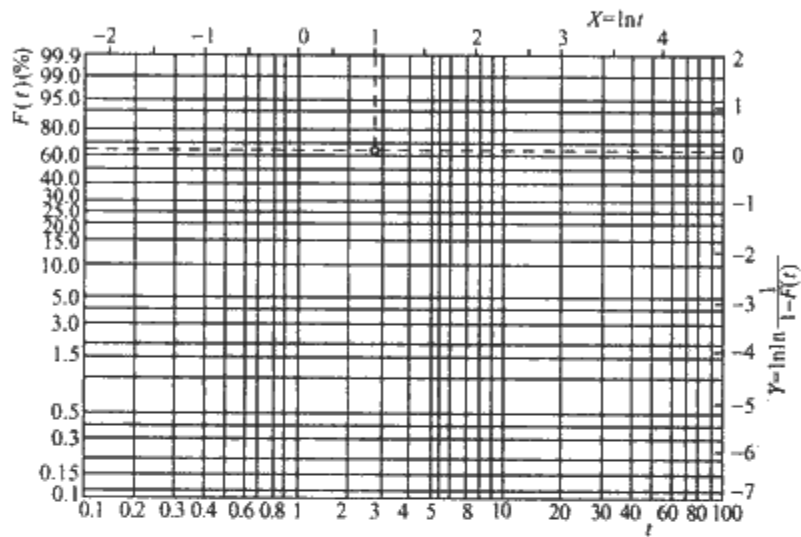


图 4.3-24 威布尔概率纸

或
$$F(t_i) = \frac{i}{n+1} \quad (4.3-91)$$

或
$$F(t_i) = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (4.3-92)$$

将计算出的 $F(t_i)$ 值与 t_i 值列表, 如表 4.3-5 所示。

表 4.3-5 累积失效概率值				
i	1	2	...	r
t_i	t_1	t_2	...	t_r
$F(t_i)$	$F(t_1)$	$F(t_2)$...	$F(t_r)$

2) 根据表 4.3-5 的数据, 按 $[t_i, F(t_i)]$ 在威布尔概率纸的 $t-F(t)$ 坐标系中描点。

3) 若所描各点基本上在一条直线上, 则可判定失效分布类型为 $\gamma = 0$ 的威布尔分布。

(3) 失效分布类型为 $\gamma \neq 0$ 的威布尔分布 (三参数威布尔分布) 的图检验步骤。按 (X_i, Y_i) 在威布尔概率纸的 $X-Y$ 坐标系中描点, 或按 $[t_i, F(t_i)]$ 在 $t-F(t)$ 坐标系中描点, 所得的轨迹不再是一条直线, 而是一条曲线。在威布尔概率纸上, 不同 γ 值时威布尔分布的累积失效分布曲线如图 4.3-25 所示。因此, 按 $[t_i, F(t_i)]$ 在 $t-F(t)$ 坐标系中描点, 所得的轨迹为一条曲线时, 可以肯定失效分布类型不是 $\gamma = 0$ 的威布尔分布, 但不能立即断定它根本不是威布尔分布, 因为它有可能是 $\gamma \neq 0$ 的威布尔分布, 当然也有可能是其他的失效分布类型。

1) 将按 $[t_i, F(t_i)]$ 在威布尔概率纸的 $t-F(t)$ 坐标系中描点所得曲线延长, 并与 t 尺相交于 M 点, M 点的读数即为 γ 的估计值 $\hat{\gamma}$ 。

2) 按 $t'_i = t_i - \hat{\gamma}$ 计算出 t'_i 并列表, 如表 4.3-6 所示, 然后, 按 $[t'_i, F(t_i)]$ 在威布尔概率纸的 $t-F(t)$ 坐标系中描点 (也可不计算 t'_i , 而将原有按照 $[t_i, F(t_i)]$ 所描的各点依

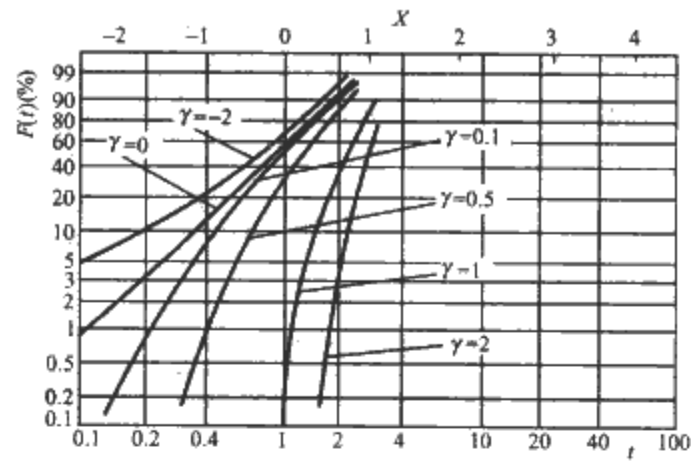


图 4.3-25 $m=2, t_0=1$, 不同 γ 值时威布尔分布的累积失效分布曲线

t 尺坐标向左平移 $\hat{\gamma}$, 而得一组新点, 如图 4.3-26 所示)。

表 4.3-6 t'_i 及 $F(t_i)$ 值				
i	1	2	...	r
t'_i	t'_1	t'_2	...	t'_r
$F(t_i)$	$F(t_1)$	$F(t_2)$...	$F(t_r)$

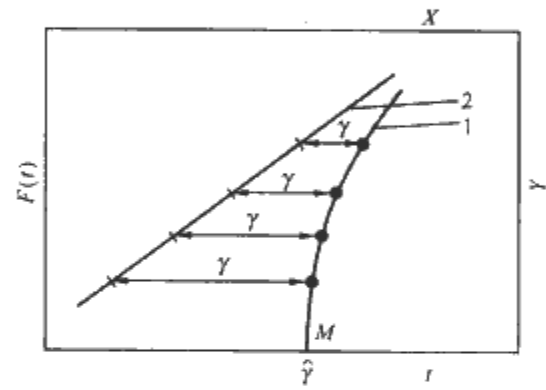


图 4.3-26 $\gamma \neq 0$ 的威布尔分布
1—按 $[t_i, F(t_i)]$ 描点所得的曲线;
2—按 $[t'_i, F(t_i)]$ 描点所得的曲线

3) 若按上一步骤所描得的各点基本上在一条直线上, 则可判定失效分布类型为 $\gamma \neq 0$ 的威布尔分布。

例如: 设有某型号的接触器 20 只进行寿命试验, 当试验到 10 只接触器失效时, 试验停止, 其寿命数据如表 4.3-7 所示。试估计该型号接触器的失效分布类型, 并用图检验法进行检验。

表 4.3-7 某型号接触器的寿命数据 $\times 10^5$ 次										
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_i	6.6	7.7	8.5	9.8	10.6	11.2	12.7	13.4	14.1	14.9

解: 先绘制可靠度曲线以估计失效分布类型, 计算出 $R(t_i)$ 并列表, 如表 4.3-8 所示。

表 4.3-8 某型号接触器的 $R(t_i)$ 、 $F(t_i)$ 及 t'_i 值										
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R(t_i)$	0.975	0.925	0.875	0.825	0.775	0.725	0.675	0.625	0.575	0.525
$F(t_i)$	0.025	0.075	0.125	0.175	0.225	0.275	0.325	0.375	0.425	0.475
t'_i	1.3	2.4	3.2	4.5	5.3	5.9	7.4	8.1	8.8	9.6

再按表 4.3-7 中的 t_i 及表 4.3-8 中的 $R(t_i)$ 的数据绘制可靠度曲线, 如图 4.3-27 所示。

将图 4.3-27 所示的可靠度曲线与表 4.3-2 中各种失效分布类型的可靠度曲线进行比较, 可看出它的形状与 $m > 1$ 的威布尔分布的可靠度曲线相近, 所以可估计其失效分布类型

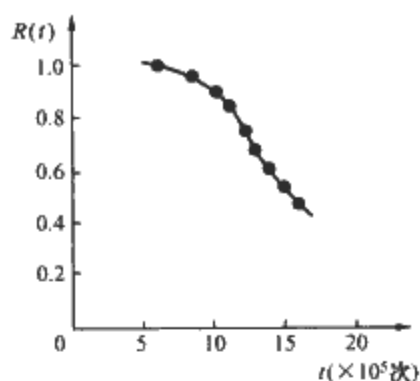


图 4.3-27 可靠度曲线

为威布尔分布。

下面用威布尔概率纸来检验其失效分布类型。按 $F(t_i) = 1 - R(t_i)$ 计算 $F(t_i)$, 所得结果亦列于表 4.3-8。根据表 4.3-7 中的 t_i 及表 4.3-8 中的 $F(t_i)$ 的数据, 按 $[t_i, F(t_i)]$ 在威布尔概率纸的 $t-F(t)$ 坐标系中描点, 其轨迹近似为一条曲线 (见图 4.3-28 中曲线 1), 该曲线与 t 尺交于 M 点, 由 M 点的读数可得 γ 的估计值 $\hat{\gamma} = 5.3 \times 10^5$ 次。

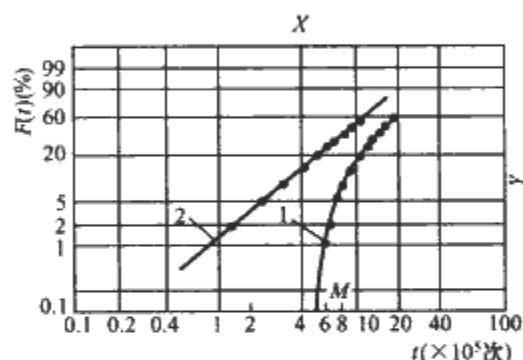


图 4.3-28 $\gamma \neq 0$ 的威布尔分布的图检验

- 1—按 $[t_i, F(t_i)]$ 描点所得的曲线;
- 2—按 $[t'_i, F(t_i)]$ 描点所得的曲线

再按 $t'_i = t_i - \hat{\gamma}$ 计算出 t'_i , 亦列于表 4.3-8 中。并按 $[t'_i, F(t_i)]$ 在威布尔概率纸的 $t-F(t)$ 坐标系中描点 (如图 4.3-28 所示)。由图 4.3-28 可以看出, 这些点的轨迹近似为一条直线, 所以该型号接触器的失效分布类型可认为是 $\gamma \neq 0$ 的威布尔分布。

4.3.1.3 用正态概率纸检验失效分布类型是否为正态分布

(1) 正态概率纸的结构原理。以 t 为横坐标, 以 u 为纵坐标, 再在纵坐标上按照式 (4.3-93) 的关系刻上 $F(t)$ 坐标, 这样就构成了正态概率纸的原理图, 如图 4.3-29 所示。

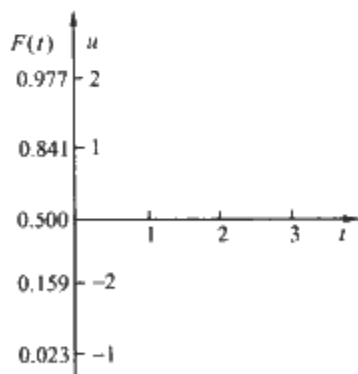


图 4.3-29 正态概率纸的原理图

$$F(t) = \Phi(u) = \int_{-\infty}^u \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (4.3-93)$$

$$\text{其中} \quad u = \frac{t - \mu}{\sigma} \quad (4.3-94)$$

为了使用方便, 常把 $F(t)$ 坐标尺移至概率纸左边, t 坐标尺移至概率纸下面 (u 坐标尺一般不标出), 则就成了通

常所用的正态概率纸, 如图 4.3-30 所示。

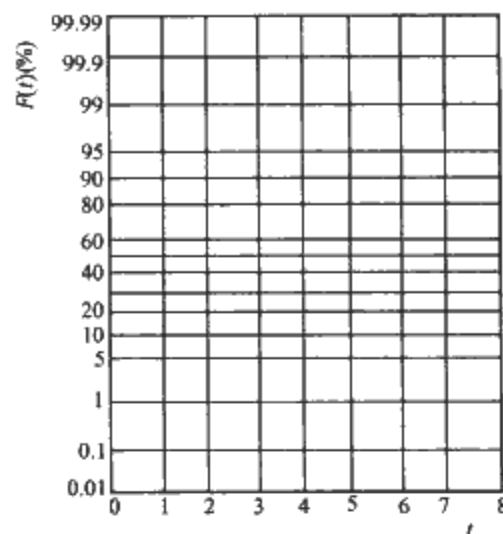


图 4.3-30 正态概率纸

(2) 失效分布类型为正态分布的图检验法。如果按 $[t_i, F(t_i)]$ 在正态概率纸上所描得的各点近似在一条直线上, 则可判定其失效分布类型为正态分布。其具体判断步骤与失效分布类型为 $\gamma=0$ 的威布尔分布的判断步骤完全相似, 所不同的只是要在正态概率纸上描点。

4.3.2 失效分布类型的 χ^2 检验法 (适合于子样容量 $n \geq 50$ 的情况)

4.3.2.1 失效分布类型 χ^2 检验法的基本概念

设 $F_0(x)$ 是已知的分布函数 (一般称为理论分布函数), $F(x)$ 为总体的分布函数, x_1, x_2, \dots, x_n 是分布函数为 $F(x)$ 的总体的一组子样观察值。所谓失效分布类型的 χ^2 检验法就是根据子样观察值 x_1, x_2, \dots, x_n 去检验关于总体分布的假设 H_0 是否成立的一种方法。

其中所说的假设 H_0 为 $F(x)$ 等于 $F_0(x)$, 即

$$H_0: F(x) = F_0(x) \quad (4.3-95)$$

在进行 χ^2 检验时, 要求理论分布函数 $F_0(x)$ 的类型及其参数都是已知的。实际上 $F_0(x)$ 的类型一般可根据前面介绍的失效分布类型的估计方法来确定, 而其参数值往往是未知的, 这时需要先对其参数作出估计, 然后进行 χ^2 检验。

首先, 把区间 $(-\infty, \infty)$ 分为 k 个不相交的区间 (a_i, a_{i+1}) , 其中 $i = 1, 2, \dots, k$, 其分界点为 a_2, a_3, \dots, a_k , 其中 a_1 及 a_{k+1} 可分别取为 $-\infty$ 及 ∞ , 区间的宽度可以不等, 其划分方法视具体情况而定。子样观察值 x_1, x_2, \dots, x_n 落在第 i 个区间 (a_i, a_{i+1}) 内的个数 m_i 称为第 i 个区间的实际频数。随机变量 X 落在第 i 个区间 (a_i, a_{i+1}) 内的概率 P_i 与子样容量 n 的乘积 nP_i 称为第 i 个区间的理论频数。其中 P_i 可根据已知的理论分布函数 $F_0(x)$ 由式 (4.3-96) 求得, 即

$$P_i = P(a_i \leq X \leq a_{i+1}) = F_0(a_{i+1}) - F_0(a_i) \quad (4.3-96)$$

统计量 χ^2 如式 (4.3-97) 所示

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i} \quad (4.3-97)$$

规定: 当统计量 $\chi^2 > c_1$ (c_1 是某一常数) 时, 拒绝假设 H_0 , 一般将 $\chi^2 > c_1$ 的范围称为否定域; 当统计量 $\chi^2 < c_1$ 时, 接受假设 H_0 。

4.3.2.2 常数 c_1 值的确定方法 (否定域的确定)

即使假设 H_0 实际上是正确的, 但是由于作出判断的依据是一个子样, 所以有可能拒绝假设 H_0 , 显然, 这是一种错误。犯这种错误的概率记作 α , 一般称为显著性水平, 即

$$P(\text{拒绝 } H_0 \mid H_0 \text{ 为真}) = P(\chi^2 > c_1 \mid H_0 \text{ 为真}) = \alpha$$

(4.3-98)

要想把显著性水平限制在一定数值以下，一般取 $\alpha = 0.05$ ，以减小犯错误的概率。其中

$$c_1 = \chi^2_{1-\alpha}(k-r-1)$$

(4.3-99)

因此，否定域为

$$\chi^2 > \chi^2_{1-\alpha}(k-r-1)$$

(4.3-100)

其中 $\chi^2_{1-\alpha}(k-r-1)$ 为自由度为 $k-r-1$ 的 χ^2 分布的下侧分位数，具体数据可由附录 C (χ^2 分布下侧分位数表) 查得。

4.3.2.3 失效分布类型的 χ^2 检验法的检验步骤

(1) 根据前面失效分布类型的估计，对理论分布函数 $F_0(x)$ 的函数类型作出假设，即对总体的失效分布类型作出假设。

(2) 求出理论分布函数 $F_0(x)$ 中各参数的估计值。

(3) 对总体的分布函数 $F(x)$ 作出假设 H_0 ，即假设 H_0 为 $F(x) = F_0(x)$ 。

(4) 将 $(-\infty, \infty)$ 划分为 k 个区间。

(5) 统计各区间的实际频数 $m_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 。

(6) 根据已知的理论分布函数 $F_0(x)$ ，求出随机变量 X 落在各区间内的概率 P_i 。

(7) 计算各区间的理论频数 nP_i (应注意任一个区间的理论频数不小于 5，最好在 10 以上。否则，应适当地将区间合并，以使 nP_i 值满足上述要求)。

(8) 列表表示 m_i, P_i, nP_i 和 $\frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i}$ 。

(9) 按式 (4.3-97) 计算统计量 χ^2 。

(10) 选定显著性水平 α 值。

(11) 确定否定域 $\chi^2 > \chi^2_{1-\alpha}(k-r-1)$ ，其中 $\chi^2_{1-\alpha}(k-r-1)$ 可根据自由度 $(k-r-1)$ 及 $1-\alpha$ 由附录 C 查得。

(12) 作出判断：当 $\chi^2 > \chi^2_{1-\alpha}(k-r-1)$ 时，拒绝假设 H_0 ；当 $\chi^2 < \chi^2_{1-\alpha}(k-r-1)$ 时，接受假设。

例如：设有某型号继电器 50 只进行寿命试验，其寿命数据如表 4.3-9 所示。已估计该型号继电器的失效分布类型为正态分布，试用 χ^2 检验法检验该型号继电器寿命是否服从正态分布 (取显著性水平 $\alpha=0.05$)。

表 4.3-9 50 只继电器的寿命数据 $\times 10^5$ 次										
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_i	3.5	6	7.2	7.8	8.5	9	9.6	10.2	10.4	10.6
i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
t_i	10.9	11.3	11.9	11.9	12.5	12.7	12.8	13	13.3	13.6
i	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
t_i	13.9	14.1	14.4	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8	15	15.1
i	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
t_i	15.3	15.6	15.8	15.9	16.3	16.4	16.5	16.7	16.8	17
i	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
t_i	17.3	17.6	17.9	18.8	19.8	20.6	21.4	21.6	21.9	25.6

解：(1) 假设理论分布函数 $F_0(x)$ 的类型为正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 。

(2) 对该型号继电器寿命数据进行分组统计，各组频数 Δm_i 及中值 t_{xi} 等值列于表 4.3-10 中。

表 4.3-10 该型号继电器寿命数据的分组统计

i	寿命范围 (10^5 次)	t_{xi} (10^5 次)	Δm_i	f_i^*	F_i
1	0~4	2	1	0.02	0.02
2	4~8	6	3	0.06	0.08
3	8~12	10	10	0.2	0.28
4	12~16	14	20	0.4	0.68
5	16~20	18	11	0.22	0.90
6	20~24	22	4	0.08	0.98
7	24~28	26	1	0.02	1

(3) 算出子样的平均寿命 \bar{t} ，并将它作为总体平均寿命 μ 的估计值 $\hat{\mu}$ ，即

$$\hat{\mu} = \bar{t} = \left[\frac{1}{50} (2 \times 1 + 6 \times 3 + 10 \times 10 + 14 \times 20 + 18 \times 11 + 22 \times 4 + 26 \times 1) \times 10^5 \right] \text{ 次}$$

$$= 14.24 \times 10^5 \text{ 次}$$

可算得子样的寿命标准离差 $s = 4.79 \times 10^5$ 次，并将它作为总体的寿命标准离差的估计值 σ 。

(4) 对总体的失效分布函数 $F(x)$ 作出假设 H_0 ，即假设 H_0 为

$$F(t) = F_0(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 4.79 \times 10^5} e^{-\frac{(x-14.24 \times 10^5)^2}{45.89 \times 10^{10}}} dx$$

(5) 将 $(-\infty, \infty)$ 划分为 5 个区间，即 $(-\infty, 10 \times 10^5 \text{ 次})$ ， $(10 \times 10^5 \text{ 次}, 12 \times 10^5 \text{ 次})$ ， $(12 \times 10^5 \text{ 次}, 16 \times 10^5 \text{ 次})$ ， $(16 \times 10^5 \text{ 次}, 18 \times 10^5 \text{ 次})$ ， $(18 \times 10^5 \text{ 次}, \infty)$ 。

(6) 统计各区间的实际频数 m_i ，将结果列于表 4.3-11 中。

表 4.3-11 χ^2 检验计算表

区间号 i	区间范围 (10^5 次)	m_i	P_i	nP_i	$\frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i}$
1	$-\infty \sim 10$	7	0.188 1	9.41	0.62
2	10~12	7	0.131 8	6.59	0.03
3	12~16	20	0.323 2	16.16	0.91
4	16~18	9	0.140 6	7.03	0.55
5	18~ ∞	7	0.216 3	10.82	1.35

(7) 计算随机变量 X 落在各区间内的概率 P_i ，将结果亦列于表 4.3-11。

下面以随机变量 X 在 $(10 \times 10^5 \text{ 次}, 12 \times 10^5 \text{ 次})$ 内的概率 P_2 的计算为例来说明 P_i 的计算方法。令 $t_{p1} = 10 \times 10^5$ 次，可得

$$u_{p1} = \frac{t_{p1} - \hat{\mu}}{\sigma} = \frac{10 \times 10^5 - 14.24 \times 10^5}{4.79 \times 10^5} = -0.885$$

由附录 B 可查得与此 u_{p1} 值相对应的 $p_1 = 0.188 1$ ，再令 $t_{p2} = 12 \times 10^5$ 次，可得

$$u_{p2} = \frac{t_{p2} - \hat{\mu}}{\sigma} = \frac{12 \times 10^5 - 14.24 \times 10^5}{4.79 \times 10^5} = -0.468$$

由附录 B 可查得与此 u_{p2} 值相对应的 $p_2 = 0.319 9$ ，从而可求得

$$P_2 = p_2 - p_1 = 0.319 9 - 0.188 1 = 0.131 8$$

(8) 计算各区间的理论频数 nP_i ，其结果列于表 4.3-11 中。

(9) 计算各区间的 $\frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i}$ ，其结果列于表 4.3-11 中。

(10) 根据表 4.3-11 中数据,按式 (4.3-97) 求得统计量 χ^2 ,即

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i} = 3.46$$

(11) 选取显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

(12) 确定否定域。令 $k=5, r=2, \alpha=0.05$, 所以 $\chi^2_{1-\alpha}(k-r-1) = \chi^2_{0.95}(2)$, 由附录 C 可查得 $\chi^2_{0.95}(2) = 5.99$, 因此, 否定域为

$$\chi^2 > 5.99$$

(13) 作出判断。由于

$$\chi^2 = 3.46 < 5.99$$

所以不能拒绝假设 H_0 而接受该假设, 亦即可认为在显著性水平 $\alpha=0.05$ 时该型号的继电器的寿命服从正态分布。

4.3.3 失效分布类型的 K-S 检验方法(子样容量 n 可小于 50)

4.3.3.1 K-S 检验法的基本概念

K-S 检验法与 χ^2 检验法一样, 也是根据子样观察值 x_1, x_2, \dots, x_n 去检验关于总体分布的假设 $H_0: F(x) = F_0(x)$ 是否成立的一种方法。

K-S 检验法也需要找一个统计量来描述经验分布函数 $F_n(x)$ 与理论分布函数 $F_0(x)$ 间的偏离程度。这个统计量用 λ 来表示, 即

$$\lambda = \sqrt{n}D \tag{4.3-101}$$

式中: D 为理论分布函数与经验分布函数的差异度。

D 等于 $F_0(x)$ 与 $F_n(x)$ 的最大差值, 即

$$D = \max |F_n(x) - F_0(x)| \tag{4.3-102}$$

当 $\lambda > c_2$ (c_2 是某一个常数) 时, 拒绝假设 H_0 ; 当 $\lambda < c_2$ 时, 接受假设 H_0 。

4.3.3.2 常数 c_2 值的确定方法 (否定域的确定)

把错误拒绝实际上是正确的假设 H_0 的概率 α 称为显著性水平 (也有资料把它称为风险率或危险率)。另外, 把 $1 - \alpha = \beta$ 称为置信度, 则

$$P(\lambda > c_2) = \alpha \tag{4.3-103}$$

或
$$P(\lambda < c_2) = 1 - P(\lambda > c_2) = 1 - \alpha = \beta \tag{4.3-104}$$

$$c_2 = \lambda_\beta \tag{4.3-105}$$

λ_β 与 β 值的关系如表 4.3-12 所示。

表 4.3-12 不同 β 值时的 λ_β 值												
β	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	0.99
λ_β	0.44	0.52	0.57	0.65	0.71	0.77	0.89	0.97	1.07	1.22	1.36	1.63

4.3.3.3 K-S 检验法的检验步骤

(1) 根据前面失效分布类型的估计, 对理论分布函数 $F_0(x)$ 的函数类型作出假设。

(2) 求出 $F_0(x)$ 中各参数的估计值。

(3) 对总体的分布函数作出假设 $H_0: F(x) = F_0(x)$ 。

(4) 根据子样的容量用式 (4.3-89) ~ 式 (4.3-92) 计算 $F_n(t_i)$, 其结果列于表 4.3-13 中。

表 4.3-13 寿命数据的统计				
i	1	2	...	n
t_i	t_1	t_2	...	t_n
$F_n(t_i)$	$F_n(t_1)$	$F_n(t_2)$...	$F_n(t_n)$
$F_0(t_i)$	$F_0(t_1)$	$F_0(t_2)$...	$F_0(t_n)$
$ F_n(t_i) - F_0(t_i) $	$ F_n(t_1) - F_0(t_1) $	$ F_n(t_2) - F_0(t_2) $...	$ F_n(t_n) - F_0(t_n) $

(5) 根据已知的理论分布函数 $F_0(x)$ 计算 $F_0(t_i)$, 其结果列于表 4.3-13 中。

(6) 计算 $|F_n(t_i) - F_0(t_i)|$, 其结果也列于表 4.3-13 中。

(7) 根据式 (4.3-102) 可由表 4.3-13 查得 D 值, 再按式 (4.3-101) 计算出统计量 λ 。

(8) 选定显著性水平 α (或置信度 β)。

(9) 确定否定域 $\lambda > \lambda_\beta$, 式中 λ_β 可根据置信度 β 由表 4.3-12 查得。

(10) 作出判断: 当 $\lambda > \lambda_\beta$ 时, 拒绝假设 H_0 ; 当 $\lambda < \lambda_\beta$ 时, 不能拒绝假设 H_0 而接受该假设。

4.3.3.4 K-S 检验的作图法

上述 K-S 检验是用分析、计算的方法进行检验, 可把它称为 K-S 检验的分析法。在实际使用中, K-S 检验也有用作图的方法来检验的, 所以也可把它称为 K-S 检验的作图法。

下面以检验指数分布为例, 说明其具体步骤:

(1) 根据前面失效分布类型的估计, 对理论分布函数 $F_0(x)$ 的函数类型作出假设。

(2) 求出 $F_0(x)$ 中各参数的估计值。

(3) 在单边对数坐标纸上画出表示理论分布的可靠度函数的直线 (见图 4.3-31 中直线 L)。

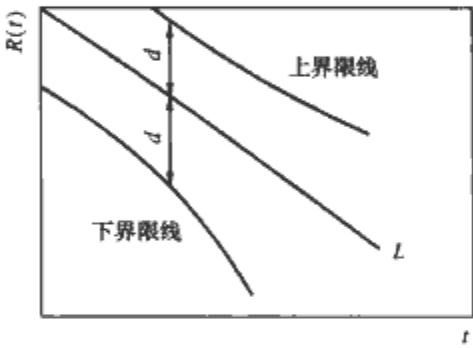


图 4.3-31 K-S 检验的作图法

(4) 选定显著性水平 α 。

(5) 根据 α 值由表 4.3-14 查出 d 值。

(6) 在图 4.3-31 中表示理论分布的可靠度函数的直线 L 上下, 画出与它的距离为 d 的上下界限线 (见图 4.3-31)。

(7) 根据寿命试验数据计算出 $R(t_i)$, 并按照 $[t_i, R(t_i)]$ 在图 4.3-31 中描点。

(8) 若所描的各点中任意一点越出了图 4.3-31 中的上、下界限线所包围的范围, 则拒绝关于总体失效分布类型的假设; 若所描各点均未越出上、下界限所包围的范围, 则不能拒绝关于总体失效分布类型的假设而予以接受。

表 4.3-14 K-S 检验的 d 值					
显著性水平 α	0.2	0.15	0.1	0.05	0.01
子样容量					
3	0.565	0.597	0.642	0.708	0.828
4	0.494	0.525	0.564	0.624	0.733
5	0.446	0.474	0.474	0.565	0.699
10	0.32	0.342	0.368	0.410	0.490
15	0.266	0.283	0.304	0.338	0.404
20	0.231	0.246	0.246	0.294	0.356
25	0.21	0.22	0.24	0.27	0.32
30	0.19	0.20	0.22	0.24	0.29
35	0.18	0.19	0.21	0.23	0.27
40	0.17	0.18	0.19	0.21	0.25
45	0.16	0.17	0.18	0.20	0.24
50	0.15	0.16	0.17	0.19	0.23
>50	$1.07/\sqrt{n}$	$1.14/\sqrt{n}$	$1.22/\sqrt{n}$	$1.36/\sqrt{n}$	$1.63/\sqrt{n}$

5 可靠性特征量的估计

在实际工作中,一般都是抽一定数量的产品进行寿命试验,或者由现场使用中收集失效数据来获得产品寿命的子样观察值(对电器产品来说,大多数采用寿命试验来获得子样观察值),然后根据子样观察值,求得与总体可靠性特征量比较接近的一个估计值(或估计区间)。

由子样观察值求总体可靠性特征量估计值(或估计区间)的方法常可分为两种。一种方法是在各种概率纸等特制的坐标纸上作图的方法,一般称为图估计法,这种方法的缺点是所得结果往往因人而异,精确性较差,但由于它具有使用方便、直观易懂、截尾寿命试验(不等到试样全部失效就停止的寿命试验)时也适用等优点,因而图估计法仍得到广泛应用,特别是在精确度要求不很高的场合,其优点尤为突出。另一种方法是用数理统计的方法来进行计算,一般称为数值分析法,其中又可分为点估计法及区间估计法两种。

5.1 可靠性特征量的点估计

5.1.1 点估计的概念

点估计法就是根据子样观察值求出可靠性特征量的一个估计值。

5.1.2 完全寿命试验时可靠性特征量的点估计

完全寿命试验是指试验到所有试品均失效时才停止的寿命试验,若抽 n 个样品进行试验, t_1, t_2, \dots, t_n 为寿命子样观察值,则可把寿命子样观察值的均值 \bar{t} 看为总体平均寿命 μ 的点估计值 $\hat{\mu}$,即

$$\hat{\mu} = \bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (4.3-106)$$

同样,寿命子样的方差 s^2 及标准离差 s 也可看成总体寿命方差 σ^2 及寿命标准离差 σ 的点估计值,即

$$\sigma^2 = s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 \quad (4.3-107)$$

$$\sigma = s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (4.3-108)$$

当产品寿命服从单参数指数分布时,失效率 λ 的点估计值为

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{\theta} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (4.3-109)$$

当产品寿命服从双参数指数分布时,其位置参数 γ 的点估计值为

$$\hat{\gamma} = t_1 - \frac{1}{n(n-1)} \left(\sum_{i=1}^n t_i - n t_1 \right) \quad (4.3-110)$$

失效率 λ 的点估计值为

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i - \hat{\gamma}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i - n \hat{\gamma}} \quad (4.3-111)$$

5.1.3 截尾寿命试验时可靠性特征量的点估计

截尾寿命试验是指不等到试样全部失效就停止的寿命试验。按其停止试验的方式,它分为定数截尾寿命试验与定时截尾寿命试验两种。

定数截尾寿命试验是指寿命试验开始后试品的失效数达到规定的失效数就停止的寿命试验。

定时截尾寿命试验是指寿命试验开始后到规定的试验截止时间(或操作次数)就停止的寿命试验。

定数或定时截尾寿命试验还分有替换及无替换两种情况。

有替换寿命试验是为了保持装置或设备能正常工作,每当其中有一个元件失效时,立即用一个好的元件替换上去,所以在试验中无论发生多少次失效,该元件在装置或设备中的总数始终保持不变。

无替换寿命试验是若试品失效后不再换上好的试品,而将剩下的未失效的试品继续进行寿命试验的情况。

综上所述,按试验截尾方式及有无替换,可将寿命试验分为四种:有替换定数截尾寿命试验、无替换定数截尾寿命试验、有替换定时截尾寿命试验、无替换定时截尾寿命试验。对电器产品来说,大多数采用无替换定时截尾寿命试验及无替换定数截尾寿命试验。

(1) 寿命服从单参数指数分布,无替换定数截尾寿命试验时可靠性特征量的点估计。

若有 n 个试品进行寿命试验,试到第 r 个试品失效时停止试验,其寿命数据为 t_1, t_2, \dots, t_r ,则可用极大似然法来求产品平均寿命 θ 的点估计值 $\hat{\theta}$ 。

极大似然法的基本概念为:若待估计的特征量是平均寿命 θ ,根据一组寿命子样观察值可计算出一个平均寿命点估计值 $\hat{\theta}$,而根据另一组寿命子样观察值用同一个计算公式可算得另一个 $\hat{\theta}$ 值,由于子样的随机性,所计算得的两个 $\hat{\theta}$ 值一般是不相同的,所以平均寿命的点估计值 $\hat{\theta}$ 也是一个随机变量。在 θ 的一切可能值中选出一个使子样观察值出现的概率为最大的 $\hat{\theta}$ 值,此 $\hat{\theta}$ 值即为平均寿命的极大似然估计值,其计算公式为

$$\theta = \frac{1}{r} \left[\sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t_r \right] = \frac{T}{r} \quad (4.3-112)$$

失效率的点估计值为

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{\hat{\theta}} = \frac{r}{\sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t_r} = \frac{r}{T} \quad (4.3-113)$$

式中: T 为总试验时间。

对无替换定数截尾寿命试验,其值为

$$T = \sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t_r \quad (4.3-114)$$

(2) 寿命服从单参数指数分布,无替换定时截尾寿命试验时可靠性特征量的点估计。

若有 n 个试品进行寿命试验,试到规定的截止时间 t_c 时试验停止,其寿命数据为 t_1, t_2, \dots, t_r ,采用极大似然法来求产品平均寿命 θ 的点估计值 $\hat{\theta}$,其计算公式如下:

平均寿命的点估计值为

$$\theta = \frac{1}{r} \left[\sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t_c \right] = \frac{T}{r} \quad (4.3-115)$$

失效率的点估计值为

$$\hat{\lambda} = \frac{r}{\sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t_c} = \frac{r}{T} \quad (4.3-116)$$

式中: T 为总试验时间。

对无替换定时截尾寿命试验, T 为

$$T = \sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t_c \quad (4.3-117)$$

(3) 寿命服从双参数指数分布,无替换定时截尾寿命试验时平均寿命的点估计。

设有 n 个试品进行无替换寿命试验,试到 $t = t_c$ 时试验停止,共失效 r 个试品,其寿命数据为 t_1, t_2, \dots, t_r ,考虑到数据变换关系,寿命服从双参数指数分布时平均寿命的

点估计值可用式 (4.3-118) 求得, 即

$$\theta = \frac{T}{r} - \left(\frac{n}{r} - 1\right) \hat{y} \quad (4.3-118)$$

$$\text{式中 } \hat{y} = t_1 - \frac{1}{n(r-1)} \left[\sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t_r - m_1 \right] \quad (4.3-119)$$

式中 T 应按式 (4.3-117) 求得。

(4) 寿命服从双参数指数分布, 无替换定数截尾寿命试验时平均寿命的点估计。

求平均寿命点估计值 θ 的公式与式 (4.3-118) 相同, 但式中 T 应按式 (4.3-114) 求得。

5.1.4 小样本时可靠性特征量的点估计

所谓小样本时可靠性特征量的估计, 是指失效试品个数很少情况下的可靠性特征量的估计。采用极大似然估计方法修正模型 (MMLE), 进行小样本情况下可靠性特征量的估计。极大似然估计方法修正模型的建立方法如下:

设有 n 个产品进行定时截尾试验, 到时间 t_c 时中止试验。设观察到 r 个产品失效, 其失效数据为 $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_r (t_r \leq t_c)$ 。

假设产品的寿命服从单参数指数分布, 则平均寿命的估计公式如下

$$\theta_M = \frac{\sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t_c}{r+L} \quad (4.3-120)$$

式中 L 用下列公式计算

$$L = \begin{cases} 0 & (r=n) \\ \min \left\{ 1, \frac{\ln t_c - \ln t_r}{EZ_{n,r+1} - EZ_{n,r}} \right\} & (r < n) \end{cases} \quad (4.3-121)$$

其中 $EZ_{n,k}$ 的值用下列公式来计算, 即

$$EZ_{n,k} = \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{k-0.5}{n+0.25} \right) \right] \quad (4.3-122)$$

5.1.5 无失效数据时可靠性特征量的点估计

对于比较贵重、寿命很长及检查项目较多的电器产品, 如断路器、成套装置等电器, 由于检查的项目较多, 在考核其可靠性时必须逐项进行检查, 若每台定期进行检查, 其试验费用很大, 为减少试验成本, 当考核其可靠性指标时, 可采用截尾时间不同的寿命试验方法, 即试品同时投入, 不定时地检查其中的某几台, 检查后不论试品是否失效, 即退出试验, 这样可降低试验成本。

5.1.5.1 基本方法

由于产品可靠性很高, 按照上述试验方法进行试验, 可能会出现每次检查时, 均未发现试品失效的情况, 即出现无失效数据。即在时刻 t_i 有 m_i 个产品不失效, 即 $i=1, 2, 3, \dots, k; t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_k; n = m_1 + m_2 + \dots + m_k; n_i = m_i + m_{i+1} + \dots + m_k$ 。这里将这类数据称为无失效数据。对于这类数据若采用经典方法进行估计会带来较大的误差, 这里采用分级 Bayes 方法在电器无失效数据时进行可靠性特征量的估计。

以威布尔分布为例加以讨论。

5.1.5.2 可靠性特征量的估计

设产品寿命服从两参数威布尔分布, 其累积失效分布函数为 $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}$, 其中 η 和 m 为未知参数。设 $t=t_i$ 时的累积失效概率为 p_i , 则 $p_i = 1 - e^{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^m}, i=1, 2, \dots, k$ 。由 \hat{p}_i 代替 p_i , 用加权最小二乘法, 取权为 $\omega_i =$

$m_i t_i / \sum_{i=1}^k m_i t_i$, 得到参数 η 和 m 的估计为

$$\eta = e^{(B-C-AD)/(B-A^2)} \quad (4.3-123)$$

$$\hat{m} = (B-A^2)/(D-AC) \quad (4.3-124)$$

其中

$$A = \sum_{i=1}^k \omega_i \ln \ln (1 - \hat{p}_i)^{-1} \quad (4.3-125)$$

$$B = \sum_{i=1}^k \omega_i [\ln \ln (1 - \hat{p}_i)^{-1}]^2 \quad (4.3-126)$$

$$C = \sum_{i=1}^k \omega_i \ln t_i \quad (4.3-127)$$

$$D = \sum_{i=1}^k \omega_i \ln t_i \ln \ln (1 - \hat{p}_i)^{-1} \quad (4.3-128)$$

则在 $t = \tau$ 时, 产品的可靠度估计为

$$R(\tau) = e^{-\left(\frac{\tau}{\eta}\right)^m} \quad (4.3-129)$$

其他的可靠性特征量可由可靠性特征量与分布参数的关系得到。

例如: 对于某电器产品, 其寿命服从两参数 Weibull 分布, 为考核其可靠性指标, 共抽取 10 台进行试验。当操作次数到达 0.8×10^5 次时, 对其中的两台进行检查, 两台试品没有失效, 此两台试品退出试验; 到达 1×10^5 次时, 对剩余试品中的 3 台进行检查, 也无失效发生, 此 3 台试品退出试验; 当到达 1.8×10^5 次时, 对剩余试品中的 3 台试品进行检查, 结果无失效发生; 当到达 1.2×10^6 次时, 停止试验, 检查最后 2 台试品, 也未发生失效, 其数据如表 4.3-15 所示。试求此电器产品的平均寿命的估计值 $\hat{\mu}$ 。

表 4.3-15 试验数据

i	t_i (次)	m_i	n_i
1	80 000	2	10
2	100 000	3	8
3	180 000	3	5
4	1 200 000	2	2

解: (1) 确定先验信息。假定过去对该型号共有 N 台产品进行了试验, 其寿命试验数据为 t_1, t_2, \dots, t_N , 采用经典方法, 可对过去该型号产品的可靠度进行点估计, 给定产品寿命 t_L , 可求得该产品在 t_L 时的可靠度

$$R(t_L) = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N} \quad (4.3-130)$$

式中

$$V_i = \begin{cases} 1 & (t_i \geq t_L) \\ 0 & (t_i < t_L) \end{cases} \quad (4.3-131)$$

如可估计出产品的寿命为 $t_L = 10^6$ 次时的可靠度为 0.9, 即 $R(10^6 \text{ 次}) = 0.9$ 。

可将此经验数据 $R(10^6 \text{ 次}) = 0.9$ 作为估计该批产品可靠性特征量的先验信息。

(2) 确定参数 c 。根据上述的先验信息, 利用式 (4.3-123)~式 (4.3-129) 可计算出 c 为 80~89 时, 形状参数 m 和真尺度参数 η 的估计值 \hat{m} 和 $\hat{\eta}$ 、寿命等于 10^6 次时产品的可靠度估计值 $\hat{R}(1 \times 10^6 \text{ 次})$, 以及平均寿命 μ 的估计值 $\hat{\mu} \left[\hat{\mu} = \hat{\eta} \Gamma \left(1 + \frac{1}{\hat{m}} \right) \right]$, 如表 4.3-16 所示, 与可靠度 $R(10^6 \text{ 次})$ 等于 0.9 先验信息最为接近的 c 等于 83, 故确定超参数 b 的均匀分布上限 c 取 83。

表 4.3-16 计算结果

c	\hat{m}	$\hat{\eta}$ (10 ⁸ 次)	$\hat{\mu}$ (10 ⁸ 次)	\hat{R} (10 ⁶ 次)
80	0.441	1.57	3.98	0.897 8
81	0.440	1.60	4.06	0.898 6
82	0.440	1.64	4.14	0.899 4
83	0.440	1.67	4.22	0.900 1
84	0.440	1.70	4.30	0.900 9
85	0.439	1.74	4.39	0.901 6
86	0.439	1.77	4.47	0.902 3
87	0.439	1.81	4.55	0.903 1
88	0.439	1.84	4.64	0.903 8
89	0.439	1.88	4.72	0.904 5

(3) 估计产品的平均寿命 $\hat{\mu}$ 。因此, 该产品的寿命服从形状参数 $m=0.44$ 、真尺度参数 $\eta=1.67 \times 10^8$ 次的两参数威布尔分布。其平均寿命点估计值 $\hat{\mu}=4.22 \times 10^8$ 次。

5.2 可靠性特征量的区间估计

5.2.1 区间估计的概念

对总体的某一个可靠性特征量给出一个估计区间的方法就称为置信区间估计法, 简称区间估计法。区间估计的具体方法如下:

若要对总体某一个可靠性特征量 θ 作出估计, 则通过一定的方法定出一个区间 (θ_L, θ_U) 。该区间包含 θ 的真实值的概率一般用 $1-\alpha$ 表示, 其数学表达式为

$$P(\theta_L \leq \theta \leq \theta_U) = 1 - \alpha \tag{4.3-132}$$

通常把 $1-\alpha$ 称为置信度或置信水平, α 称为显著性水平, 区间 (θ_L, θ_U) 称为置信区间, θ_L 称为置信下限, θ_U 称为置信上限。由于这种区间估计方法要求出上、下两个置信限, 所以这种区间估计法称为求双侧置信限的区间估计法。

在进行区间估计时, 首先应规定置信度。一般取置信度 $1-\alpha$ 为 0.9 或 0.6。

5.2.2 指数分布时可靠性特征量的双侧置信限的区间估计

5.2.2.1 无替换定数截尾寿命试验时平均寿命的区间估计

经数学推导可得

$$P\left[\frac{2T}{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(2r)} \leq \theta \leq \frac{2T}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}(2r)}\right] = 1 - \alpha \tag{4.3-133}$$

所以无替换定数截尾寿命试验时平均寿命的置信下限 θ_L 及置信上限 θ_U 分别为

$$\theta_L = \frac{2T}{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(2r)} \tag{4.3-134}$$

$$\theta_U = \frac{2T}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}(2r)} \tag{4.3-135}$$

式中: $\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(2r)$ 和 $\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}(2r)$ 为自由度等于 $2r$ 的 χ^2 分布的下侧分位数。

5.2.2.2 无替换定时截尾寿命试验时平均寿命的区间估计

可以证明, 定时截尾寿命试验时平均寿命的置信下限 θ_L 及置信上限 θ_U 分别为

$$\theta_L = \frac{2T}{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(2r+2)} \tag{4.3-136}$$

$$\theta_U = \frac{2T}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}(2r)} \tag{4.3-137}$$

式中: $\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(2r+2)$ 为自由度等于 $2r+2$ 的 χ^2 分布的下侧分位数。

5.2.3 指数分布时可靠性特征量的单侧置信限的下限估计

以置信度 $1-\alpha$ 保证平均寿命的真实值 θ 大于某一值 θ'_L , 亦即要求

$$P(\theta'_L \leq \theta < \infty) = 1 - \alpha \tag{4.3-138}$$

这种区间估计方法常称为求平均寿命单侧置信限的区间估计法。

经数学推导可得

$$P\left[\frac{2T}{\chi^2_{1-\alpha}(2r)} \leq \theta < \infty\right] = 1 - \alpha \tag{4.3-139}$$

对于寿命服从单参数分布、无替换定数截尾寿命试验平均寿命下限估计法的置信下限 θ_L 为

$$\theta_L = \frac{2T}{\chi^2_{1-\alpha}(2r)} \tag{4.3-140}$$

对于无替换定时截尾寿命试验, 平均寿命下限估计法的置信下限 θ_L 为

$$\theta_L = \frac{2T}{\chi^2_{1-\alpha}(2r+2)} \tag{4.3-141}$$

5.3 可靠性特征量的图估计

5.3.1 指数分布时可靠性特征量的图估计

5.3.1.1 单参数指数分布的图估计

(1) 参数 λ 的图估计。在单边对数坐标纸上的 $R(t)$ 尺上找到读数为 0.368 的 A 点向右作水平线, 该水平线交回归直线 L 于 B 点, 交点 B 的 t 坐标即为平均寿命 θ 的估计值 $\hat{\theta}$, 如图 4.3-32 所示。

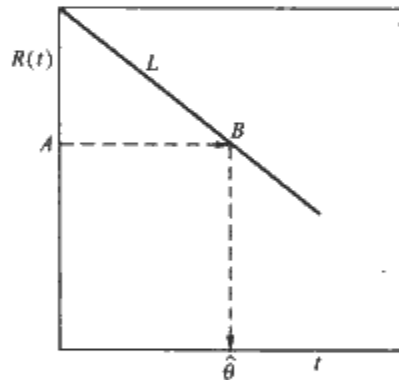


图 4.3-32 参数 λ 的图估计

分布参数 λ 的图估计为

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{\hat{\theta}}$$

(2) 可靠性特征量的图估计。在图 4.3-32 的 t 坐标尺上找到给定的工作时间, 向回归直线 L 上作垂线, 此垂线和回归直线 L 的交点的 $R(t)$ 坐标就是可靠度函数 $R(t)$ 的图估计值 $\hat{R}(t)$ 。

累积失效概率 $F(t)$ 的图估计值 $\hat{F}(t) = 1 - \hat{R}(t)$ 。

寿命标准离差的图估计值 $\sigma = \theta$ 。

在 $R(t)$ 坐标尺上找到读数为 R 的点, 作水平线和回归直线 L 相交的点的 t 坐标即为可靠寿命 t_R 的估计值 \hat{t}_R 。

中位寿命 $t_{0.5}$ 的图估计方法与上述可靠寿命 t_R 的图估计方法相同, 只要令 $R = 0.5$ 即可。

5.3.1.2 双参数指数分布的图估计

(1) 位置参数 γ 的图估计。在单边对数坐标纸上的 $R(t)$ 尺上找到读数为 1 的 D 点作水平线, 该水平线交回归直线 L 于 E 点, 交点 E 的 t 坐标即为位置参数 γ 的估计值 $\hat{\gamma}$, 如图

4.3-33 所示。

(2) 参数 λ 的图估计。在单边对数坐标纸的 $R(t)$ 尺上找到读数为 0.368 的 A 点作水平线, 该水平线交回归直线 L 于 B 点, 交点 B 的 t 坐标即为平均寿命 θ 的估计值 $\hat{\theta}$, 如图 4.3-33 所示。

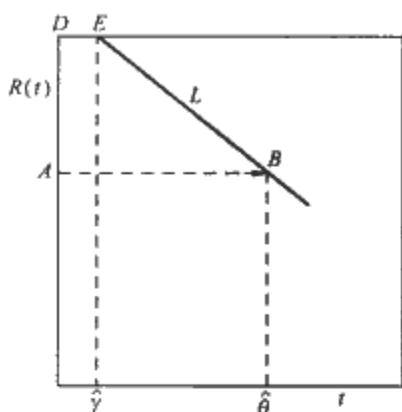


图 4.3-33 位置参数 γ 和参数 λ 的图估计

$$\text{分布参数 } \lambda \text{ 的图估计 } \hat{\lambda} = \frac{1}{\theta - \hat{\gamma}}$$

(3) 可靠性特征量的图估计。在图 4.3-33 的 t 坐标尺上找到给定的工作时间, 向回归直线 L 上作垂线, 此垂线和回归直线 L 的交点的 $R(t)$ 坐标就是可靠度函数 $R(t)$ 的图估计值 $\hat{R}(t)$ 。

累积失效概率 $F(t)$ 的图估计值 $\hat{F}(t) = 1 - \hat{R}(t)$ 。

寿命标准离差的图估计值 $\sigma = \theta - \hat{\gamma}$ 。

在 $R(t)$ 坐标尺上找到读数为 R 的点作水平线, 和回归直线 L 相交的点的 t 坐标即为可靠寿命 t_R 的估计值 \hat{t}_R 。

中位寿命 $t_{0.5}$ 的图估计方法与上述可靠寿命 t_R 的图估计方法相同, 只要令 $R = 0.5$ 即可。

5.3.2 威布尔分布时可靠性特征量的图估计

5.3.2.1 $\gamma=0$ 的威布尔分布时的图估计

5.3.2.1.1 威布尔分布的参数 m , t_0 及 η 的图估计

(1) 形状参数 m 的估计。过 m 的估计点 ($X=1, Y=0$) 作回归直线 $Y = mX - B$ 的平行线, 该直线与 Y 坐标轴交点 A 的纵坐标等于 $-m$ 。因此, 形状参数 m 的估计值 \hat{m} 即为图 4.3-34 所示 B 点的读数的绝对值。

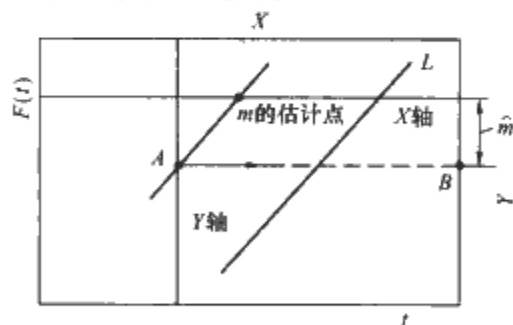


图 4.3-34 \hat{m} 的求法

(2) 真尺度参数 η 的估计。 η 的估计值 $\hat{\eta}$ 可由威布尔概率纸直接读出。由回归直线与 X 坐标轴的交点 P 向下作垂线, 该垂线与 t 尺交于 Q 点, 此 Q 点的读数即为 $\hat{\eta}$, 如图 4.3-35 所示。

5.3.2.1.2 可靠性特征量的图估计

(1) 平均寿命的图估计。根据已求出的 \hat{m} 值, 在 μ/η 尺上查得 $\hat{\mu}/\eta$, 则由式 (4.3-142) 求得平均寿命 μ 的估计值 $\hat{\mu}$ 为

$$\hat{\mu} = \hat{\eta} \frac{\hat{\mu}}{\eta} \quad (4.3-142)$$

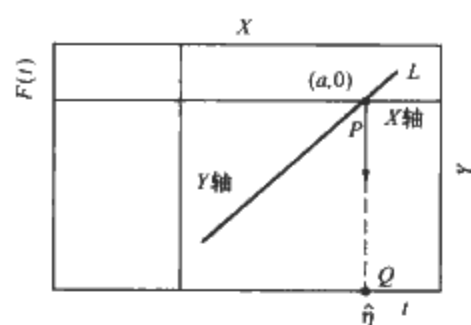


图 4.3-35 η 的求法

也可根据已求出的 \hat{m} 值, 在 $F(\mu)$ 尺上查得相应的 $\hat{F}(\mu)$, 再在 $F(t)$ 尺上找到读数等于 $\hat{F}(\mu)$ 的 E 点, 由 E 点向右作水平线交回归直线 L 于 F 点, 再由 F 点作垂线与 t 尺交点 G 的读数为 $\hat{\mu}$ (见图 4.3-36)。

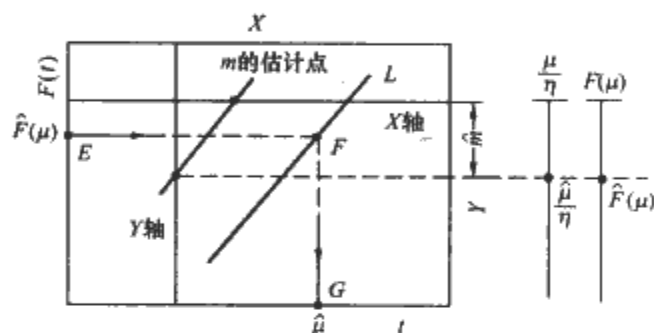


图 4.3-36 μ 的求法

(2) 寿命标准离差 σ 的图估计。根据已求出的 \hat{m} 值, 在 σ/η 尺上查得相应的 $\hat{\sigma}/\eta$, 则由式 (4.3-143) 可求得寿命标准离差的估计值, 即

$$\hat{\sigma} = \hat{\eta} \frac{\hat{\sigma}}{\eta} \quad (4.3-143)$$

也可根据 \hat{m} 值在 $F(\sigma)$ 尺上查得相应的 $\hat{F}(\sigma)$, 再在 $F(t)$ 尺上找到读数等于 $\hat{F}(\sigma)$ 的 R 点, 由 R 点向右作水平线交回归直线 L 于 S 点, 再由 S 点向下作垂线与 t 尺交于 T 点, 则 T 点的读数即为 $\hat{\sigma}$ 的估计值 $\hat{\sigma}$ (见图 4.3-37)。

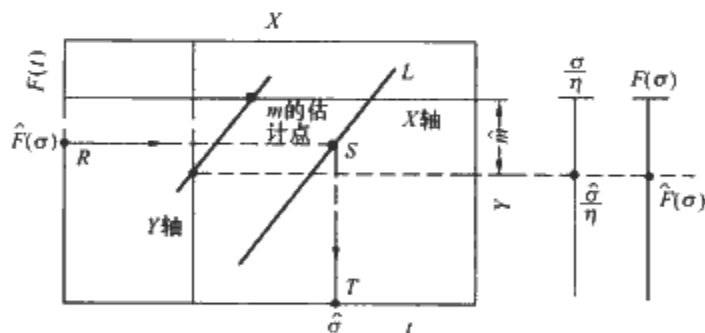


图 4.3-37 σ 的求法

当形状参数 $m < 1.5$ 时, 威布尔概率纸右侧的 μ/η , σ/η 及 m 尺的精度较差, 所以在威布尔概率纸的上侧还刻有放大的 μ/η , σ/η 及 m 尺。因此, 一张完整的威布尔概率纸的右侧有 μ/η , σ/η , $F(\mu)$ 及 $F(\sigma)$ 尺, 而威布尔概率纸的上侧有放大的 μ/η , σ/η 及 m 尺, 如图 4.3-38 所示。

(3) 给定工作时间 t_{gd} 时的可靠度 $R(t_{gd})$ 的图估计。在 t 尺上找到读数等于 t_{gd} 的 A 点, 由 A 点向上作垂线交回归直线 L 于 B 点, 再由 B 点向左作水平线, 此水平线与 $F(t)$ 尺交点的读数应等于 $F(t_{gd})$ 的估计值 $\hat{F}(t_{gd})$, 如图 4.3-39 所示, 则可由式 $\hat{R}(t_{gd}) = 1 - \hat{F}(t_{gd})$ 求得 $R(t_{gd})$ 的估计值 $\hat{R}(t_{gd})$ 。

(4) 给定可靠度 R 时可靠寿命 t_R 的图估计。在 $F(t)$ 尺上取读数等于 $1-R$ 的 C 点, 由 C 点向右作水平线交回归直

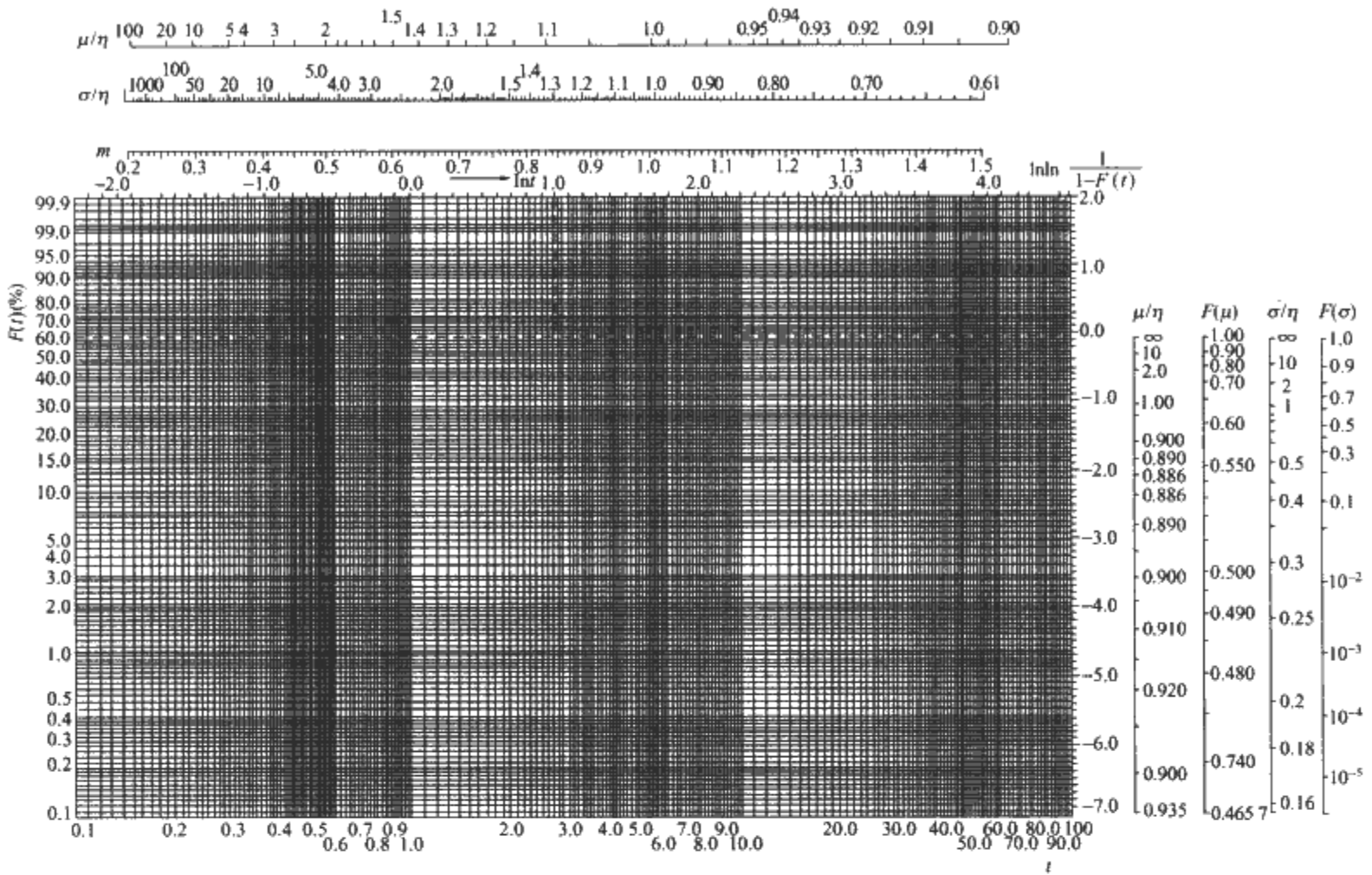


图 4.3-38 完整的威布尔概率纸

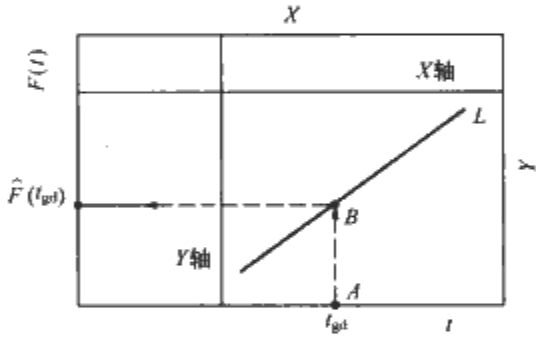


图 4.3-39 $\hat{F}(t_{gd})$ 的求法

线 L 于 D 点, 再由 D 点向下作垂线, 此垂线与 t 尺交点 E 的读数即为 t_R 的估计值 \hat{t}_R , 如图 4.3-40 所示。

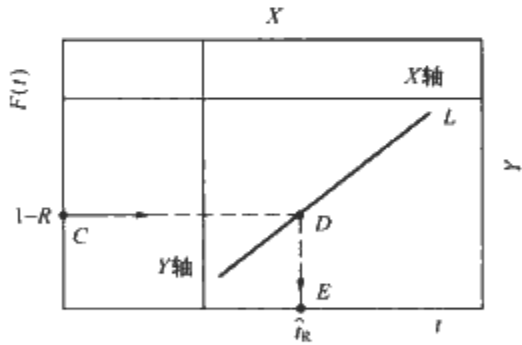


图 4.3-40 \hat{t}_R 的求法

(5) 中位寿命 $t_{0.5}$ 的图估计。中位寿命 $t_{0.5}$ 的图估计方法与上述可靠寿命 t_R 的图估计方法相同, 只要令 $R=0.5$ 即可。

5.3.2.2 $\gamma \neq 0$ 的威布尔分布时的图估计

5.3.2.2.1 威布尔分布的参数 m, η 及 γ 的图估计

当产品寿命服从 $\gamma \neq 0$ 的威布尔分布时, 按 $[t_i, F(t_i)]$ 在威布尔概率纸的 $t-F(t)$ 坐标系中描点, 其轨迹为一条曲线, 此曲线与 t 尺交点的读数即为位置参数 γ 的估计值 $\hat{\gamma}$, 此曲线经直线化后所得的直线也称回归直线, 根据此回归直线, 用与 $\gamma=0$ 的威布尔分布时相同的方法, 可求得参数 m 及 η 的估计值。

5.3.2.2.2 可靠性特征量的图估计

(1) 平均寿命 μ 的图估计。用 $\gamma=0$ 时相同的方法, 利用 μ/η 尺或 $F(\mu)$ 尺求得 $\hat{\mu}'$, 如图 4.3-41 所示。

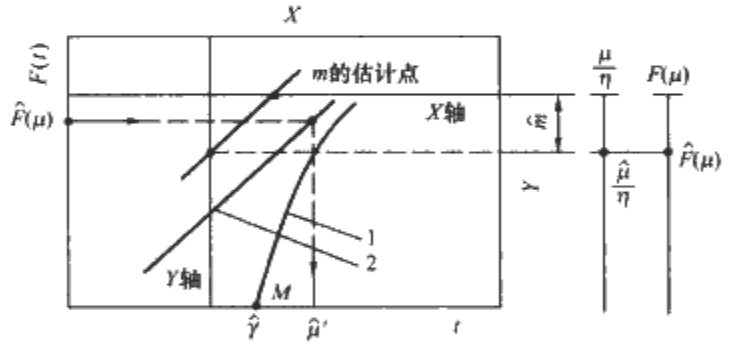


图 4.3-41 $\gamma \neq 0$ 时 μ 的求法

- 1—按 $[t_i, F(t_i)]$ 所描各点的轨迹;
- 2—直线化后所得的回归直线

所求的平均寿命估计值 $\hat{\mu}$ 应按式 (4.3-144) 计算

$$\hat{\mu} = \hat{\mu}' + \hat{\gamma} \quad (4.3-144)$$

(2) 寿命标准离差 σ 的图估计 (其方法与 $\gamma=0$ 时完全相同)。

(3) 工作到给定时间 t_{gd} 时可靠度 $R(t_{gd})$ 的图估计。其方法与 $\gamma=0$ 时相似, 仅有的差别是, 由 t 尺上读数等于 t_{gd} 的 A 点向上作垂线时, 应取该垂线与 $[t_i, F(t_i)]$ 所描各点的轨迹 (见图 4.3-42 中的曲线 1) 的交点 B , 然后再由 B 点向左作水平线, 它与 $F(t)$ 尺交点的读数即为 $\hat{F}(t_{gd})$, 如图 4.3-42 所示。所求的 $R(t_{gd})$ 的估计值 $\hat{R}(t_{gd})$ 可由 $\hat{R}(t_{gd}) = 1 - \hat{F}(t_{gd})$ 求得。

(4) 给定可靠度 R 时可靠寿命 t_R 的图估计。由 $F(t)$ 上读数等于 $1-R$ 的 C 点向右作水平线, 与按 $[t_i, F(t_i)]$ 所描各点的轨迹 (见图 4.3-43 中曲线 1) 的交点为 D , 然后再由

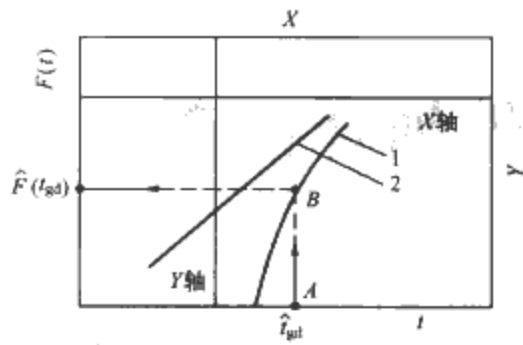


图 4.3-42 $\gamma \neq 0$ 时 $\hat{F}(t_{\text{gd}})$ 的求法
1—按 $[t_i, F(t_i)]$ 所描各点的轨迹;
2—直线化后所得的回归直线

D 点向下作垂线, 该垂线与 t 尺交点 E 的读数即为可靠寿命 t_R 的估计值 \hat{t}_R , 如图 4.3-43 所示。

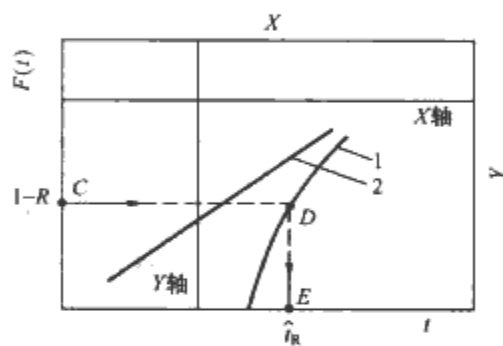


图 4.3-43 $\gamma \neq 0$ 时 \hat{t}_R 的求法
1—按 $[t_i, F(t_i)]$ 所描各点的轨迹;
2—直线化后所得的回归直线

(5) 中位寿命 $t_{0.5}$ 的图估计。中位寿命 $t_{0.5}$ 的图估计方法与上述可靠寿命 t_R 的图估计方法相同, 只要令 $R = 0.5$ 即可。

5.3.3 正态分布时可靠性特征量的图估计

5.3.3.1 位置参数 μ 的图估计

在正态概率纸的 $F(t)$ 尺上找到读数为 0.5 的 A 点向右作水平线, 该水平线交回归直线 L 于 B 点, 交点 B 的 t 坐标即为位置参数 μ 的估计值, 如图 4.3-44 所示。

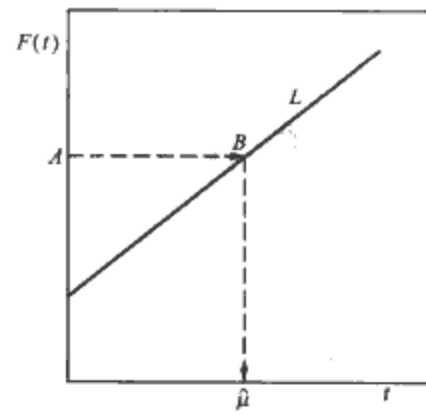


图 4.3-44 位置参数 μ 的图估计

5.3.3.2 尺度参数 σ 的图估计

在正态概率纸的 $F(t)$ 尺上找到读数为 0.841 的 C 点向右作水平线, 该水平线交回归直线 L 于 D 点, 交点 D 的 t 坐标即为 $t_{0.841}$, 而尺度参数 σ 的估计值 $\hat{\sigma} = \hat{t}_{0.841} - \mu$, 如图 4.3-45 所示。

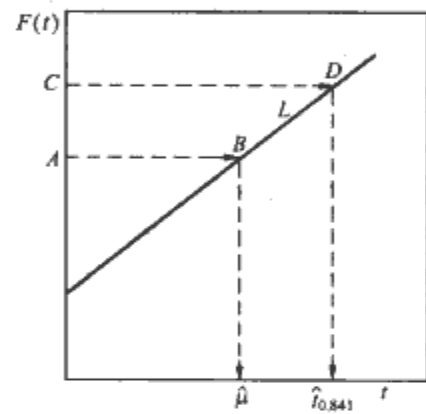


图 4.3-45 尺度参数 σ 的图估计

5.3.3.3 可靠性特征量的图估计

(1) 累积失效概率 $F(t)$ 的图估计: 在图 4.3-45 的 t 坐标尺上找到给定的工作时间, 向回归直线 L 上作垂线, 此垂线和回归直线 L 的交点的 $F(t)$ 坐标就是累积失效概率 $F(t)$ 的图估计值 $\hat{F}(t)$ 。

(2) 可靠度函数 $R(t)$ 的图估计值 $\hat{R}(t) = 1 - \hat{F}(t)$ 。

(3) 在 $F(t)$ 坐标尺上找到读数为 $1 - R$ 的点作水平线, 和回归直线 L 相交的点的 t 坐标即为可靠寿命 t_R 的估计值 \hat{t}_R 。

(4) 中位寿命 $t_{0.5}$ 的图估计方法与上述可靠寿命 t_R 的图估计方法相同, 只要令 $R = 0.5$ 即可。

第4章 低压电器可靠性抽样检查

1 抽样检查方案的分类

抽样检查方案可按其性质、用途、抽样次数及进行方式等分类。

1.1 按性质分类

抽样检查按其性质可以分为计数抽样和计量抽样两类。

1.1.1 计数抽样

从一批产品中抽取一定数量的样品进行检查,根据检查结果将样品分为合格品和不合格品两类,然后将检查出的不合格品数与事先规定的“合格判定数”进行比较,以判断该批产品是否合格。

1.1.2 计量抽样

从一批产品中抽取一定数量的样品,测量每一个样品的某一特征量,并用统计方法计算出此特征量的数值,然后与规定的标准值进行比较,以判断该批产品是否合格。

1.2 按用途分类

抽样检查按其用途可以分为质量抽样检查和可靠性抽样检查两类。

1.2.1 质量抽样检查

为了检查产品质量而进行的抽样检查。例如,对生产过程中的零部件进行的抽样检查、对产品进行的定期试验及出厂试验所采用的抽样检查。

1.2.2 可靠性抽样检查

为了检查产品的可靠性而进行的抽样检查。例如,产品的失效率抽样检查、平均寿命抽样检查、可靠寿命抽样检查。

1.3 按抽样次数分类

抽样检查按其抽样次数可以分为一次抽样检查、二次抽样检查、多次抽样检查和逐次抽样检查四类。

1.3.1 一次抽样检查

只从被检查的一批产品中抽取一次样品,根据样品的检查结果即可判断该批产品是否合格。

1.3.2 二次抽样检查

第一次从被检查的一批产品中抽取样品后,根据样品检查的结果来判断该批产品合格、不合格或还不能作出判断,而需要抽取第二次样品,再根据第二次样品的检查结果与第一次样品的检查结果来判断该批产品是否合格。

1.3.3 多次抽样检查

抽取第一次和第二次样品后,其检查结果还不能作出是否合格的判断时,应继续抽取样品进行检查,直到根据最后一次所抽取样品的检查结果与以前各次样品的检查结果作出该批产品是否合格的判断为止。

1.3.4 逐次抽样检查

根据抽样检查所得数据的逐次积累来判断该批产品是否合格。

下面以计数序贯抽样检查为例作一简要说明:以积累所抽样品数 n 为横坐标,以样品中所检查出的不合格品数 r 为

纵坐标,并在坐标纸上用一定方法画出两条直线,如图 4.4-1 所示。图 4.4-1 中直线 1 以上的区域称为不合格区,直线 2 以下的区域称为合格区,直线 1 与直线 2 之间的区域称为继续抽检区。

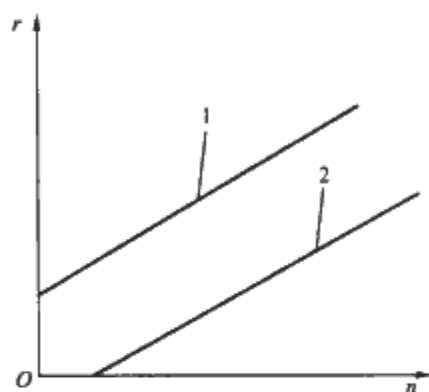


图 4.4-1 序贯抽样检查

1—不合格判定线; 2—合格判定线

当根据抽样检查结果在图 4.4-1 中所描出的数据点 (n, r) 落在合格判定线上或合格区域内时,即判断为该批产品合格;当数据点 (n, r) 落在不合格判定线上或不合格区域内时,即判断为该批产品不合格;当数据点 (n, r) 落在继续抽检区时,应继续进行抽样检查,直到能作出是否合格的判断为止。

序贯抽样检查的特点是可以使平均样本大小 ASN (平均所抽的样品数) 最小。因此,它对于检查费用高的场合尤为适用。

1.4 按进行方式分类

抽样检查按其进行方式主要分为标准型抽样检查和调整型抽样检查两类。

1.4.1 标准型抽样检查

不需要利用产品以前几次抽样检查结果的资料,就对该产品制定出抽样检查方案的方法称为标准型抽样检查。

1.4.2 调整型抽样检查

根据产品质量好坏的变化,即根据以往若干批产品抽样检查的结果,随时调整抽样检查严格程度的方法称为调整型抽样检查。它一般由正常检查、加严检查、从宽检查三种严格程度不同的抽样检查组成。从一种检查转为另一种检查需要遵循预先规定的转移规则。例如,当产品质量比较正常时,可采用正常检查;当产品质量变坏(即发生在连续若干批产品中有一定批不合格等情况)时,应从正常检查转为加严检查;当产品质量恢复正常时,又可由加严检查回至正常检查;当产品质量较好(即当满足连续若干批均合格等条件)时,应从正常检查转为从宽检查;当产品质量又下降(即出现一批不合格等情况)时,应由从宽检查回至正常检查。

2 抽样检查的基本理论

2.1 抽样检查方案的接收概率

一批产品按某一抽样检查方案进行检查而被判为合格的

概率称为该抽样方案的接收概率。显然,接收概率与该批产品的实际不合格品率 p 有关,所以记作 $L(p)$ 。

2.1.1 一次计数抽样检查方案的接收概率

所谓一次计数抽样检查方案是指在总数为 N 的一批产品中任抽 n 个样品,如果检查出的不合格品数 $r \leq A_c$ (A_c 为合格判定数),则可判断该批产品为合格;如果 $r > A_c$,则判断该批产品为不合格。一次计数抽样检查方案的框图如图 4.4-2 所示。



图 4.4-2 一次计数抽样检查方案的框图

接收概率等于任抽 n 个样品中所包含的不合格品数 r 分别为 $0, 1, \dots, A_c$ 时的概率之和。当 N 较大 ($N > 10n$) 时,此概率可用二项概率公式来计算,即

$$L(p) = \sum_{r=0}^{A_c} P(r, n | p) = \sum_{r=0}^{A_c} C_n^r p^r q^{n-r} \quad (4.4-1)$$

式中: q 为产品的合格品率。

2.1.2 二次计数抽样检查方案的接收概率

二次计数抽样方案的框图如图 4.4-3 所示。

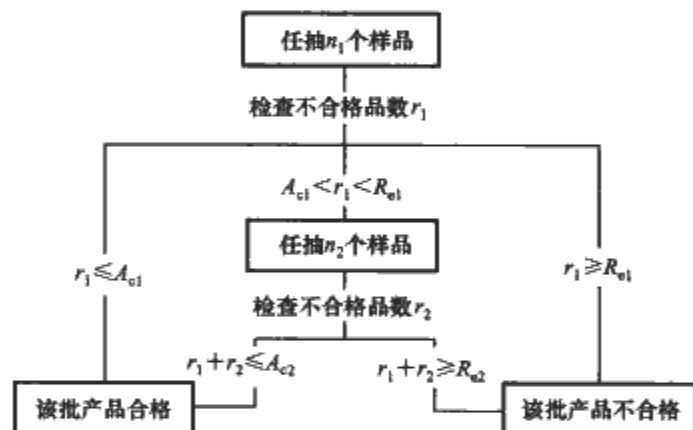


图 4.4-3 二次计数抽样检查方案的框图

图 4.4-3 中 A_{c1} 为第一合格判定数, R_{e1} 为第一不合格判定数, A_{c2} 为第二合格判定数, R_{e2} 为第二不合格判定数。

二次抽样检查方案的程序是:从一批产品中任抽 n_1 个样品,如果其中的不合格品数 r_1 小于或等于第一合格判定数 A_{c1} ,则可判断该批产品为合格;如果 r_1 大于或等于第一不合格判定数 R_{e1} ,则可判断该批产品为不合格;如果 r_1 大于 A_{c1} 但小于 R_{e1} ,则不能作出判断,这时应抽第二次样品 n_2 个进行检查,若其中的不合格品数 r_2 与第一次样品中的不合格品数 r_1 之和小于或等于第二合格判定数 A_{c2} ,则可判断该批产品为合格;若 $r_1 + r_2$ 大于或等于第二不合格判定数 R_{e2} ,则可判断该批产品为不合格。

二次计数抽样检查方案的接收概率可用下式计算,即

$$L(p) = P(r_1 \leq A_{c1}) + P(A_{c1} < r_1 < R_{e1}, r_1 + r_2 \leq A_{c2}) \quad (4.4-2)$$

当该批产品总数 N 较大 (满足 $N > 10n$) 时,式 (4.4-2) 可写为

$$L(p) = \sum_{r_1=0}^{A_{c1}} P(r_1, n_1 | p) + \sum_{r_1=A_{c1}+1}^{R_{e1}-1} P(r_1, n_1 | p) \sum_{r_2=0}^{A_{c2}-r_1} P(r_2, n_2 | p)$$

$$= \sum_{r_1=0}^{A_{c1}} C_{n_1}^{r_1} p^{r_1} q^{n_1-r_1} + \sum_{r_1=A_{c1}+1}^{R_{e1}-1} C_{n_1}^{r_1} p^{r_1} q^{n_1-r_1} \sum_{r_2=0}^{A_{c2}-r_1} C_{n_2}^{r_2} p^{r_2} q^{n_2-r_2} \quad (4.4-3)$$

2.2 抽样检查方案的抽检特性曲线及参数 p_0, p_1, α, β

某一个抽样检查方案的接收概率 $L(p)$ 与产品不合格品率 p 间的关系曲线称为该抽样检查方案的抽检特性曲线,一般简称 OC 曲线。

2.2.1 理想的抽检特性曲线

理想的抽样检查方案应该是先规定一个允许不合格品率 p_y 。当产品实际不合格品率 p 小于或等于 p_y 时,应判产品为合格,即其接收概率 $L(p)$ 应等于 1;当产品实际不合格品率 p 大于 p_y 时,产品应被判为不合格,即其接收概率 $L(p)$ 应等于零。所以理想的抽样检查方案的 OC 曲线应是阶跃形,如图 4.4-4 所示。但是这种理想的抽样检查方案实际上是不存在的,典型的 OC 曲线如图 4.4-5 所示。

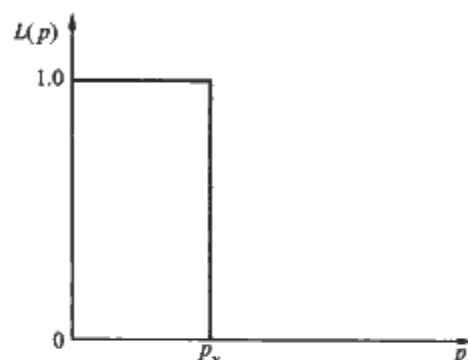


图 4.4-4 理想的抽样检查方案的 OC 曲线

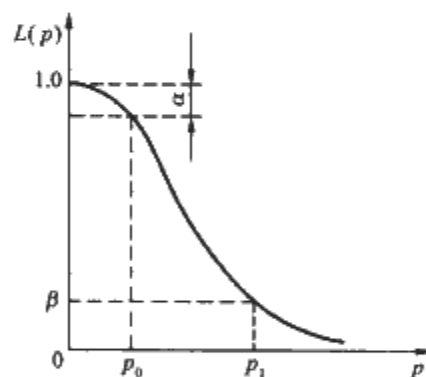


图 4.4-5 典型的 OC 曲线

2.2.2 实际的抽检特性曲线及参数 p_0, p_1, α, β

通常规定两个不合格品率 (p_0 及 p_1)，当产品实际不合格品率 p 小于或等于 p_0 时,应认为该批产品是合格的,所以 p_0 称为可接受的质量水平 (Acceptable Quality Level, AQL),在有些资料 [例如我国 GB/T 2828.1—2003《计数抽样检验程序第 1 部分:按接收质量限 (AQL) 检索的逐批检验抽样计划》] 中将 p_0 称为合格质量水平。由图 4.4-5 可以看出,当 $p = p_0$ 时的接收概率 $L(p_0) = 1 - \alpha$,拒收概率为 α , α 称为生产者风险率;当产品实际不合格品率 p 大于 p_1 时,应认为该批产品是不合格的,所以将 p_1 称为批不合格品率容限 (Lot Tolerance Percent Defect, LTPD),在有些资料 [例如我国 GB/T 2829—2002《周期检验计数抽样程序及表 (适用于对过程稳定性的检验)》] 中将 p_1 称为不合格质量水平。由图 4.4-5 可以看出,当 $p = p_1$ 时的接收概率 $L(p_1) = \beta$, β 称为使用者风险率。 $p = p_1$ 时,本应判为不合格而拒收,因此,一般把 $p = p_1$ 时拒收的概率 $1 - \beta$ 称为抽样方案的置信度。显然, α 及 β 应尽量取得小些,一般取 $\alpha =$

0.05, $\beta = 0.1$, 在使用要求高的场合, β 可取为 0.05。

p_0 与 p_1 的数值应由生产厂与用户协商确定, p_1 的数值一般由用户根据可允许的批最大不合格品率来确定。 p_0 及 p_1 值最好应满足 $p_1 \geq 3p_0$ 。

2.3 抽样检查方案的确定方法

下面以一次计数抽样检查方案为例进行阐述。

2.3.1 根据参数 p_0, p_1, α, β 来确定抽样检查方案

由图 4.4-5 可列出下列关系

$$L(p_0) = 1 - \alpha \tag{4.4-4}$$

$$L(p_1) = \beta \tag{4.4-5}$$

对于一次计数抽样检查方案, 当产品总数 $N > 10n$ 时,

式 (4.4-4) 及式 (4.4-5) 可写为

$$\sum_{r=0}^{A_c} p(r, n | p_0) = \sum_{r=0}^{A_c} C_n p_0^r q_0^{n-r} = 1 - \alpha \tag{4.4-6}$$

$$\sum_{r=0}^{A_c} p(r, n | p_1) = \sum_{r=0}^{A_c} C_n p_1^r q_1^{n-1} = \beta \tag{4.4-7}$$

由式 (4.4-6) 及式 (4.4-7) 可见, 参数 p_0, p_1, α, β 与一次计数抽样检查方案间存在一一对应关系。为了便于使用, 统计工作者已经算出了一些一次计数抽样检查表, 使用者只需根据已确定的参数 p_0, p_1, α, β 的数值, 从这些表上可以直接查出相应的一次计数抽样检查方案的 n 及 A_c 值。表 4.4-1 及表 4.4-2 是最常用的一次计数抽样检查表。

表 4.4-1 计数型一次抽样检查表 ($\alpha=0.05, \beta=0.1$)

p_1 (%) p_0 (%)	0.71~0.90	0.90~1.12	1.13~1.40	1.41~1.80	1.81~2.24	2.25~2.80	2.81~3.55	3.56~4.50	4.51~5.60	5.61~7.10	7.11~9.00	9.01~11.2	11.3~14.0	14.1~18.0	18.1~22.4	22.5~28.0	28.1~33.5	p_1 (%) p_0 (%)
0.090~0.0112	*	400 1	300 1	300 1	250 1	60 0	60 0	50 0	50 0	40 0	30 0	30 0	25 0	20 0	15 0	15 0	10 0	0.090~0.112
0.113~0.140	*	500 2	300 1	250 1	250 1	200 1	50 0	50 0	40 0	40 0	30 0	25 0	25 0	20 0	15 0	15 0	10 0	0.113~0.140
0.141~0.180	*	500 2	400 2	250 1	200 1	200 1	150 1	40 0	40 0	30 0	30 0	25 0	20 0	20 0	15 0	15 0	10 0	0.141~0.180
0.181~0.224	*	*	400 2	300 2	200 1	150 1	150 1	120 1	30 0	30 0	25 0	25 0	20 0	15 0	15 0	15 0	10 0	0.181~0.224
0.225~0.280	*	*	500 3	300 2	150 1	150 1	120 1	120 1	100 1	25 0	25 0	20 0	20 0	15 0	15 0	15 0	10 0	0.225~0.280
0.281~0.355	*	*	*	400 3	200 2	200 2	120 1	100 1	100 1	80 1	20 0	20 0	15 0	15 0	15 0	10 0	10 0	0.281~0.355
0.356~0.450	*	*	*	500 4	200 2	200 2	150 2	100 1	80 1	80 1	60 1	15 0	15 0	15 0	15 0	10 0	7 0	0.356~0.450
0.451~0.560	*	*	*	*	300 3	250 3	150 2	120 2	80 1	60 1	60 1	50 1	15 0	15 0	10 0	10 0	7 0	0.451~0.560
0.561~0.710	*	*	*	*	400 4	300 4	200 3	120 2	100 2	60 1	50 1	50 1	10 0	10 0	10 0	7 0	7 0	0.561~0.710
0.711~0.900	*	*	*	*	500 6	400 6	250 4	150 3	100 2	80 2	50 1	40 1	40 1	40 1	7 0	7 0	5 0	0.711~0.900
0.901~1.12		*	*	*	*	*	300 6	200 4	120 3	80 2	60 2	40 1	40 1	40 1	25 1	7 0	5 0	0.901~1.12
1.13~1.40			*	*	*	*	500 10	250 6	150 4	100 3	60 2	50 2	30 1	25 1	25 1	20 1	5 0	1.13~1.40
1.41~1.80				*	*	*	*	400 10	200 6	120 4	80 3	50 2	40 2	25 1	20 1	15 1	15 1	1.41~1.80
1.81~2.24					*	*	*	300 10	150 6	100 4	60 3	40 2	30 2	20 1	15 1	15 1		1.81~2.24
2.25~2.80						*	*	*	250 10	120 6	70 4	50 3	30 2	25 2	15 1	10 1		2.25~2.80
2.81~3.55							*	*	*	200 10	100 6	60 4	40 3	25 2	20 2	10 1		2.81~3.55
3.56~4.50								*	*	*	150 10	80 6	50 4	30 3	20 2	15 2		3.56~4.50
4.51~5.60									*	*	*	120 10	60 6	40 4	25 3	15 2		4.51~5.60
5.61~7.10										*	*	*	100 10	50 6	30 4	20 3		5.61~7.10
7.11~9.00											*	*	*	70 10	40 6	25 4		7.11~9.00
9.01~11.2												*	*	*	60 10	30 6		9.01~11.2
p_0 (%) p_1 (%)	0.71~0.90	0.90~1.12	1.13~1.40	1.41~1.80	1.81~2.24	2.25~2.80	2.81~3.55	3.56~4.50	4.51~5.60	5.61~7.10	7.11~9.00	9.01~11.2	11.3~14.0	14.1~18.0	18.1~22.4	22.5~28.0	28.1~33.5	p_0 (%) p_1 (%)

注 1. 表中印有 * 的地方可查表 4.4-2。
2. 表中有数字的每小格中, 左边的数字表示相应的一次抽样方案的 n 值, 右边的数字表示 A_c 值。

表 4.4-2 计数型一次抽样检查辅助表

$\frac{p_1}{p_0}$	A_c	n
1.86 ~ 1.99	20	$\frac{7.04}{p_0} + \frac{13.50}{p_1}$
2.0 ~ 2.2	15	$\frac{5.02}{p_0} + \frac{10.65}{p_1}$
2.3 ~ 2.7	10	$\frac{3.08}{p_0} + \frac{7.70}{p_1}$
2.8 ~ 3.5	6	$\frac{1.64}{p_0} + \frac{5.27}{p_1}$
3.6 ~ 4.3	4	$\frac{0.985}{p_0} + \frac{4.00}{p_1}$
4.4 ~ 5.5	3	$\frac{0.683}{p_0} + \frac{3.34}{p_1}$
5.6 ~ 7.8	2	$\frac{0.409}{p_0} + \frac{2.66}{p_1}$
7.9 ~ 16	1	$\frac{0.178}{p_0} + \frac{1.94}{p_1}$

2.3.2 根据参数 p_1 和 β 来确定抽样检查方案

即仅根据式 (4.4-7) 来确定抽样检查方案。显然, 仅有一个方程也是无法解出 n 及 A_c 两个未知数的, 这时也需要按其他的原则先确定这两个参数中的一个 (其确定方法同上), 然后再由式 (4.4-7) 来解出另一个参数。

显然, 根据 p_1 和 β 值来确定抽样检查方案的方法 (这种方法也称 LTPD 法) 是重视了使用者利益, 而未考虑生产者风险。

3 指数分布时电器产品的可靠性抽样

对电器产品的可靠性要求主要是对产品的失效率、平均寿命或可靠寿命进行考核, 为考核失效率而进行的可靠性抽样检查称为失效率抽样检查, 为考核平均寿命进行的可靠性抽样检查称为平均寿命抽样检查, 为考核可靠寿命所进行的可靠性抽样检查称为可靠寿命抽样检查。

3.1 失效率抽样

3.1.1 失效率抽样检查方案的抽检特性曲线

对于有可靠性指标的电器产品来说,其可靠性高低大多用失效率表示,并用抽样检查来鉴定失效率等级,这时,抽样方案的 OC 曲线表示接收概率与产品真实失效率之间的关系。为了有所区别,有的资料在 OC 曲线前加 R (reliability),即叫做 ROC 曲线。理想的 ROC 曲线应为阶跃形,但这种理想的 ROC 曲线是实现不了的,实际的 ROC 曲线如图 4.4-6 所示。

图 4.4-6 中 λ_0 称为合格失效率水平,一般简称为 AFR (Acceptable Failure Rate),也有的资料把 λ_0 称为合格可靠性水平,简称为 ARL (Acceptable Reliability Level)。当产品真实失效率 $\lambda \leq \lambda_0$ 时,应认为这批产品是合格的, $\lambda = \lambda_0$ 时被误判为不合格而拒收的概率为 α , α 称为生产者风险率。

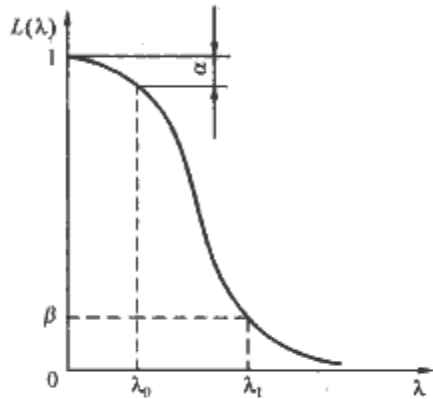


图 4.4-6 失效率抽样方案的 ROC 曲线

图 4.4-6 中 λ_1 称为批失效率容限,一般简称为 LTFR (Lot Tolerance Failure Rate);当产品真实失效率 $\lambda > \lambda_1$ 时,应认为这批产品是不合格的, $\lambda = \lambda_1$ 时,被误判为合格而接收的概率为 β , β 称为使用者风险率。

3.1.2 失效率抽样检查方案的确定方法

一般 α 取为 0.05 或 0.1, β 取为 0.1, λ_0 根据制造厂家的生产能力及用户的质量要求等各方面因素协商确定, λ_1/λ_0 值一般取 1.5~5。失效率抽样检查需要根据给定的 λ_0 , λ_1 , α , β 值来制订一个抽样检查方案,一般失效率抽样检查大多采用一次计数抽样检查方案,因而,制订失效率抽样方案就是根据给定的 λ_0 , λ_1 , α , β 值来确定抽样数 n 及允许失效数 (合格判定数) A_c 。

当产品寿命服从单参数指数分布时,可得

$$1 - \sum_{r=0}^{A_c} C_n (\lambda_0 t_g)^r (1 - \lambda_0 t_g)^{n-r} = \alpha \tag{4.4-8}$$

$$\sum_{r=0}^{A_c} C_n (\lambda_1 t_g)^r (1 - \lambda_1 t_g)^{n-r} = \beta \tag{4.4-9}$$

当满足 $n\lambda t_g < 5$ 及 $\lambda t_g < 0.1$ 时,式 (4.4-8)、式 (4.4-9) 可用式 (4.4-10)、式 (4.4-11) 表示

$$1 - \sum_{r=0}^{A_c} \frac{e^{-n\lambda_0 t_g} (n\lambda_0 t_g)^r}{r!} = \alpha \tag{4.4-10}$$

$$\sum_{r=0}^{A_c} \frac{e^{-n\lambda_1 t_g} (n\lambda_1 t_g)^r}{r!} = \beta \tag{4.4-11}$$

由给定的 λ_0 , λ_1 , α , β 值就可确定失效率抽样方案的 n 及 A_c 。

但在失效率抽样检查中常常采用所谓 λ_1 方案或 LTFR 方案,即只根据给定的 λ_1 和 β 值来确定抽样方案,在实际计算中,统计工作者已算出了 LTFR 方案抽样表供使用者查用,表 4.4-3 就是美国军用标准 MIL-S-19500 所采用的一个 LTFR 方案抽样表。它在 $\beta=0.1$, $t_g=10^3\text{h}$ 时对不同 λ_1 值及 A_c 值计算了相应的 n 值。

如给定的 t_g 值不等于 10^3h ,可按 $\lambda'_1 = \frac{\lambda_1 t_g}{10^3}$ 折算后所得

的 λ'_1 值去查表 4.4-3。

表 4.4-3 LTFR 方案抽样表 ($\beta=0.1$, $t_g=10^3\text{h}$)

合格判定数 A_c λ_1 (%/kh)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	11	18	25	32	38	45	51	57	63	69	75
15	15	25	34	43	52	60	68	77	85	93	100
10	22	38	52	65	78	91	104	116	128	140	152
7	32	55	75	94	113	131	149	166	184	201	218
5	45	77	105	132	158	184	209	234	258	282	306
3	76	129	176	221	265	308	349	390	431	471	511
2	116	195	266	333	398	462	528	589	648	709	770
1.5	153	258	354	444	531	617	700	783	864	945	1025
1	231	390	533	668	798	927	1054	1178	1300	1421	1541
0.7	328	555	759	953	1140	1323	1503	1680	1854	2027	2199
0.5	461	778	1065	1337	1599	1855	2107	2355	2599	2842	3082
0.3	767	1296	1773	2226	2663	3090	3509	3922	4329	4733	5133
0.2	1152	1946	2662	3341	3997	4638	5267	5886	6498	7103	7704
0.15	1534	2592	3547	4452	5327	6181	7019	7845	8660	9468	10 268
0.1	2303	3891	5323	6681	7994	9275	10 533	11 771	12 995	14 206	15 407

3.2 平均寿命抽样

平均寿命抽样检查时，抽样检查的 ROC 曲线表示接收概率与产品真实平均寿命间的关系，如图 4.4-7 所示。图 4.4-7 中 θ_0 称为合格平均寿命水平， θ_1 称为批平均寿命容限。

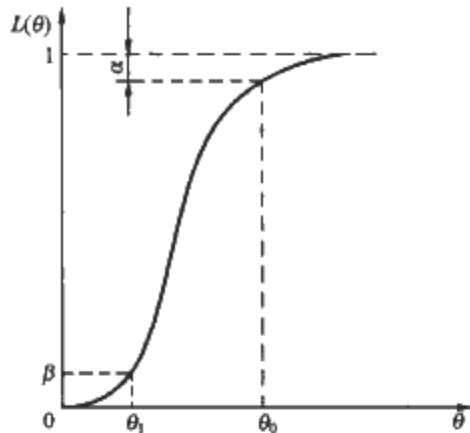


图 4.4-7 平均寿命抽样检查方案的 ROC 曲线

平均寿命抽样检查时经常根据给定的 θ_1 和 β 值来确定抽样方案。当产品寿命服从单参数指数分布时，其失效率与平均寿命互为倒数，所以 λ_1 与 θ_1 间存在下列关系

$$\lambda_1 = \frac{1}{\theta_1} \tag{4.4-12}$$

只要将给定的 θ_1 值代入式 (4.4-12)，求出相应的 λ_1 值，由表 4.4-3 即可确定抽样方案。

3.3 可靠寿命抽样

如要求电器产品应达到的可靠寿命值为 t_{gd} ，则电器产品的最大失效率 λ_{max} 可用式 (4.4-13) 求出

$$\lambda_{max} = \frac{1}{t_{gd}} (-\ln R) \tag{4.4-13}$$

按此 λ_{max} 值、给定的置信度值及试验时间 t_g ，由表 4.4-3 可查出相应的可靠寿命抽样检查方案，亦即可以把可靠寿命抽样检查转换为失效率抽样检查。

3.4 平均寿命序贯抽样

对于批量较小、价格较高的电器产品来说，可考虑采用序贯抽样检查。序贯抽样检查的核心思想为观察故障（或失效）出现时对应的累积相关试验时间，如此时间足够长，则可判为接收，如相当短，则判为拒收，如介于二者之间，则不能作判断，需继续试验，所以序贯试验可充分利用每一次失效发生时所提供的信息，从而有可能减少试品数及试验时间。

n 个试品试验到 t 时出现 r 次失效（可等效看为 n 个样品中包含 r 个不合格品）的概率 p_r 为 $e^{-np} (np)^r / r!$ ，在产品寿命服从单参数指数分布的条件下，经过数学推导可得

$$-h_1 + sr < T < h_0 + sr \tag{4.4-14}$$

判断规则为：当出现第 r 个故障（或失效）时， $T \geq h_0 + sr$ ，则判为接收； $T \leq -h_1 + sr$ ，则判为拒收。

合格判定线方程为

$$T = h_0 + sr \tag{4.4-15}$$

不合格判定线方程为

$$T = -h_1 + sr \tag{4.4-16}$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \frac{-\ln B}{\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta_0}} &= h_0 \\ \frac{\ln A}{\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta_0}} &= h_1 \\ \frac{\ln \frac{\theta_0}{\theta_1}}{\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta_0}} &= s \end{aligned} \right\} \tag{4.4-17}$$

常数 A, B 由式 (4.4-18) 确定

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{1-\beta}{\alpha} \\ B &= \frac{\beta}{1-\alpha} \end{aligned} \right\} \tag{4.4-18}$$

因此，当给定 $\theta_0, \theta_1, \alpha, \beta$ 后，由式 (4.4-15) 及式 (4.4-16) 即可作出合格判定线与不合格判定线，从而确定了序贯抽样方案，如图 4.4-8 所示。

为了避免试验时间过长，可规定适当的截尾数 r_0 ，过原点 O 作与合格判定线平行的直线 $T = sr$ ，与直线 $r = r_0$ 相交于点 (sr_0, r_0) ，再过该点作直线 $T = sr_0$ 与合格判定线相交，此线即为截尾合格判定线， $r = r_0$ 即为截尾不合格判定线（见图 4.4-8）。

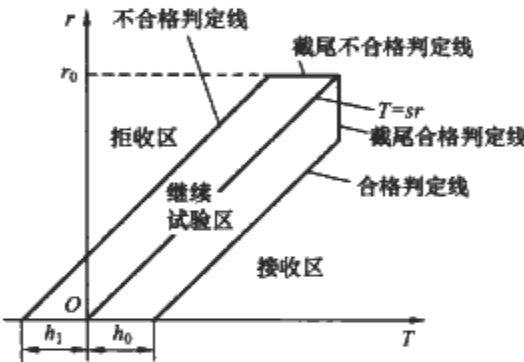


图 4.4-8 平均寿命序贯抽样方案

按上法作出图 4.4-8 后，当 $t = t_1$ 发生第一次故障（失效）时，按 $(T_1, 1)$ 在图 4.4-8 上描点，看其落在何处作出判断，以后每发生一个故障（失效），即作一次判断，当 $t = t_i$ 时，按 (T_i, i) 描点，再作判断。

对不可修复产品来说， $T_i (i = 1, 2, 3, \dots)$ 可按式 (4.4-19) 计算

$$T_i = \sum_{j=1}^i t_j + (n-i)t_i \tag{4.4-19}$$

4 威布尔分布时电器产品的可靠性抽样

威布尔分布时产品的可靠性抽样主要包括平均寿命抽样及可靠寿命抽样。所谓平均寿命抽样是指考核产品平均寿命是否满足规定要求的抽样检查，可靠寿命抽样是指考核产品的可靠寿命是否满足规定要求的抽样检查。

可靠性抽样的试验方式一般为无替换定时截尾试验（试验截止时间为 t_c ），并采用一次抽样检查方案，接收概率是 $F(t)$ 的函数，故可用 $L[F(t)]$ 表示

$$L[F(t)] = \sum_{r=0}^{A_c} C_n F(t)^r [1-F(t)]^{n-r} \tag{4.4-20}$$

式 (4.4-20) 即为确定产品可靠性抽样方案的基本关系式，并大多采用与 LTPD 法相对应的方法来确定抽样方案。

在很多情况下，威布尔分布的位置参数 γ 等于零，下面仅讨论 $\gamma=0$ 时的平均寿命抽样及可靠寿命抽样。

4.1 平均寿命抽样

平均寿命抽样就是根据规定的平均寿命值来确定一次抽样方案的样本大小 n 、合格判定数 A_c 及试验截止时间 t_c 。

当 $\gamma=0$ 时，接受概率为

$$L(\mu) = \sum_{r=0}^{A_c} C_n^r \{1 - e^{-[\frac{t_c}{\mu} \Gamma(1+\frac{1}{m})]^m}\}^r \{e^{-[\frac{t_c}{\mu} \Gamma(1+\frac{1}{m})]^m}\}^{n-r}$$

(4.4-21)

$L(\mu)$ 与 μ 的关系曲线如图 4.4-9 所示。

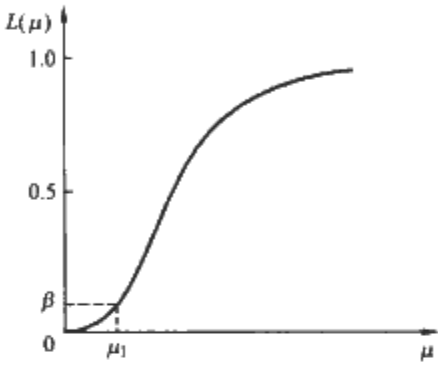


图 4.4-9 平均寿命抽样方案的 $L(\mu)$ 与 μ 的关系曲线

图 4.4-9 中 μ_1 为批平均寿命容限，即要求的最低平均寿命值， β 为使用者风险率。常把 $1-\beta$ 称为抽样方案的置信度。

由图 4.4-9 可见， $\mu=\mu_1$ 时的 $L(\mu_1) = \beta$ ，可得

$$\sum_{r=0}^{A_c} C_n^r \{1 - e^{-[\frac{t_c}{\mu_1} \Gamma(1+\frac{1}{m})]^m}\}^r \{e^{-[\frac{t_c}{\mu_1} \Gamma(1+\frac{1}{m})]^m}\}^{n-r} = \beta$$

(4.4-22)

样本大小 n 应考虑批量 N 的大小 (N 大时 n 也应选大些)、产品价格 (价高者 n 应小些)、试验周期及试验设备容量等因素来选择，一般可参照 GB/T 2828.1—2003 来确定。

当 n 确定后，若选定 t_c ，则可由式 (4.4-22) 确定 A_c ，从而确定了抽样方案；反之，若选定了 A_c (A_c 不宜选得过小，因为在产品实际平均寿命一定时， A_c 越小抽样方案的接收概率也越小)，则由式 (4.4-22) 可确定 t_c ，从而也确定了抽样方案。

根据式 (4.4-22) 可计算出置信度 $1-\beta$ 为不同值，威布尔分布的形状参数 m 为不同值时的平均寿命抽样表。置信度 $1-\beta=0.9$ ，形状参数 m 等于 0.5，1.0，1.5，2.0 时，产品平均寿命抽样表如表 4.4-4~表 4.4-7 所示。

表 4.4-4 $m=0.5$ 时的平均寿命抽样表

t_c/μ_1 n	A_c					
	0	1	2	3	4	5
2	0.662 7	4.409 7				
3	0.294 5	1.329 5	5.666 6			
5	0.106 0	0.384 4	0.979 9	2.391 8	7.489 7	
8	0.041 4	0.135 9	0.298 5	0.567 4	1.020 3	1.894 0
13	0.015 7	0.048 6	0.099 4	0.172 6	0.274 6	0.415 8
20	0.006 6	0.019 9	0.039 4	0.065 8	0.100 0	0.143 6
32	0.002 6	0.007 6	0.014 8	0.024 1	0.035 7	0.049 8
50	0.001 1	0.003 1	0.005 9	0.009 5	0.013 9	0.019 1
80	0.000 41	0.002 1	0.002 3	0.003 6	0.005 3	0.007 2

表 4.4-5 $m=1.0$ 时的平均寿命抽样表

t_c/μ_1 n	A_c					
	0	1	2	3	4	5
2	1.151 3	2.969 7				
3	0.767 5	1.630 7	3.366 5			
5	0.460 5	0.876 8	1.399 8	2.187 2	3.870 3	
8	0.287 8	0.521 3	0.772 7	1.065 3	1.428 6	1.918 3
13	0.177 1	0.311 8	0.445 9	0.587 5	0.741 1	0.911 9
20	0.115 1	0.199 6	0.280 7	0.362 7	0.447 3	0.536 0
32	0.072 0	0.123 5	0.171 8	0.219 4	0.267 1	0.315 6
50	0.046 1	0.078 6	0.108 7	0.137 8	0.166 7	0.195 6
80	0.028 8	0.048 9	0.067 4	0.085 1	0.102 5	0.119 7

表 4.4-6 $m=1.5$ 时的平均寿命抽样表

t_c/μ_1 n	A_c					
	0	1	2	3	4	5
2	1.216 8	2.288 7				
3	0.928 6	1.534 7	2.488 2			
5	0.660 6	1.014 8	1.386 2	1.866 5	2.730 7	
8	0.482 9	0.717 5	0.932 7	1.155 4	1.405 1	1.710 2
13	0.349 4	0.509 3	0.646 6	0.777 0	0.907 2	1.041 7
20	0.262 2	0.378 4	0.474 9	0.563 4	0.647 9	0.730 9
32	0.191 6	0.274 7	0.342 4	0.402 9	0.459 5	0.513 5
50	0.142 3	0.203 2	0.252 2	0.295 6	0.335 5	0.373 2
80	0.104 0	0.148 2	0.183 4	0.214 4	0.242 6	0.269 1

表 4.4-7 $m=2.0$ 时的平均寿命抽样表

t_c/μ_1 n	A_c					
	0	1	2	3	4	5
2	1.210 7	1.944 5				
3	0.988 6	1.440 9	2.070 3			
5	0.765 7	1.056 6	1.335 0	1.668 8	2.219 9	
8	0.605 4	0.814 7	0.991 9	1.164 6	1.348 6	1.562 8
13	0.474 9	0.630 0	0.753 5	0.864 9	0.971 4	1.077 5
20	0.382 9	0.504 2	0.597 9	0.679 5	0.754 7	0.826 1
32	0.302 7	0.396 6	0.467 7	0.528 5	0.583 2	0.633 9
50	0.242 1	0.316 3	0.371 9	0.418 9	0.460 7	0.499 0
80	0.191 4	0.249 6	0.292 9	0.329 2	0.361 3	0.390 5

4.2 可靠寿命抽样

可靠寿命抽样就是根据给定的可靠寿命值来确定一次抽样方案的样本大小 n 、合格判定数 A_c 及试验截止时间 t_c 。

当 $\gamma=0$ 时，可得

$$L(t_R) = \sum_{r=0}^{A_c} C_n^r [1 - e^{(\frac{t_c}{t_R})^m \ln R}]^r [e^{(\frac{t_c}{t_R})^m \ln R}]^{n-r}$$

(4.4-23)

由式 (4.4-23) 可见，当 t_R 增大时， $L(t_R)$ 与 t_R 的关系曲线如图 4.4-10 所示。

图 4.4-10 中的 t_{R1} 为批可靠寿命容限。

与平均寿命抽样时一样, $1-\beta$ 称为可靠寿命抽样方案的置信度。

由图 4.4-10 可见, $t_R=t_{R1}$ 时 $L(t_{R1})=\beta$, 将此关系式代入式 (4.4-23) 可得

$$\sum_{r=0}^{A_c} C_n^r [1 - e^{(\frac{t_c}{t_{R1}})^m \ln R}]^r [e^{(\frac{t_c}{t_{R1}})^m \ln R}]^{n-r} = \beta$$

(4.4-24)

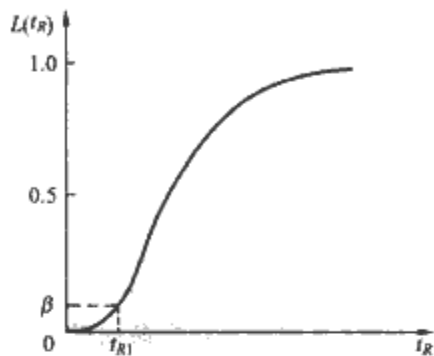


图 4.4-10 可靠寿命抽样方案的 $L(t_R)$ 与 t_R 的关系曲线

可靠寿命抽样时, 样本大小 n 的确定方法与平均寿命抽样时相同。在 n 确定后, 根据给定的 t_c 值可由式 (4.4-24) 确定 A_c , 从而确定了抽样方案; 反之, 若选定了 A_c , 则由式 (4.4-24) 可确定试验截止时间 t_c 。

置信度 $1-\beta=0.9$, 形状参数 m 分别等于 0.5, 1.0, 1.5, 3.0 时, 可靠度为 0.9 的可靠寿命抽样表如表 4.4-8~表 4.4-11 所示。

表 4.4-8 $m=0.5$ 时可靠度为 0.9 的可靠寿命抽样表

$\frac{t_c}{\mu_1} \backslash A_c$	0	1	2	3	4	5
n						
2	119.40	794.48				
3	53.080	239.54	1020.9			
5	19.104	69.255	176.52	430.93	1349.4	
8	7.462 7	24.479	53.780	102.23	183.83	331.50
13	2.826 1	8.755 0	17.914	31.089	49.481	74.909
20	1.194 0	3.589 8	7.099 2	11.849	18.025	25.876
32	0.466 4	1.374 4	2.659 7	4.335 8	6.429 0	8.974 2
50	0.191 0	0.559 4	1.063 5	1.711 4	2.503 4	3.444 8
80	0.074 6	0.215 7	0.409 0	0.652 8	0.946 8	1.291 6

表 4.4-9 $m=1$ 时可靠度为 0.9 的可靠寿命抽样表

$\frac{t_c}{\mu_1} \backslash A_c$	0	1	2	3	4	5
n						
2	10.927 2	28.184 6				
3	7.284 8	15.477 0	31.952 1			
5	4.370 9	8.322 0	13.286 2	20.758 8	36.734 1	
8	2.731 8	4.947 7	7.333 5	10.111 0	13.558 5	18.207 1
13	1.681 1	2.958 9	4.232 5	5.575 7	7.034 3	8.655 0
20	1.092 7	1.894 7	2.664 4	3.442 2	4.245 6	5.086 9
32	0.682 9	1.172 3	1.630 8	2.082 2	2.535 5	2.995 7
50	0.437 1	0.745 9	1.031 3	1.308 2	1.582 2	1.856 0
80	0.273 2	0.464 4	0.639 5	0.807 9	0.973 1	1.136 5

表 4.4-10 $m=1.5$ 时可靠度为 0.9 的可靠寿命抽样表

$\frac{t_c}{\mu_1} \backslash A_c$	0	1	2	3	4	5
n						
2	4.924 2	9.261 8				
3	3.757 9	6.210 5	10.069 3			
5	2.673 3	4.106 6	5.609 6	7.553 3	11.050 4	
8	1.954 2	2.903 6	3.774 6	4.675 9	5.586 0	6.920 9
13	1.413 8	2.061 0	2.616 6	3.144 4	3.671 3	4.215 5
20	1.060 9	1.531 2	1.921 9	2.279 8	2.622 0	2.957 8
32	0.775 5	1.111 8	1.385 5	1.630 6	1.859 4	2.076 1
50	0.575 9	0.822 5	1.020 7	1.196 1	1.357 8	1.510 3
80	0.421 0	0.599 7	0.742 3	0.867 5	0.982 0	1.089 0

表 4.4-11 $m=3$ 时可靠度为 0.9 的可靠寿命抽样表

$\frac{t_c}{\mu_1} \backslash A_c$	0	1	2	3	4	5
n						
2	2.213 1	3.043 3				
3	1.938 5	2.492 1	3.173 2			
5	1.635 0	2.026 5	2.368 5	2.748 3	3.324 2	
8	1.397 9	1.704 0	1.942 8	2.162 4	2.384 5	2.630 8
13	1.189 0	1.435 6	1.617 6	1.773 2	1.916 1	2.053 2
20	1.030 0	1.237 4	1.386 3	1.509 9	1.619 3	1.719 8
32	0.880 6	1.054 4	1.177 1	1.277 0	1.363 6	1.441 6
50	0.758 9	0.906 9	1.010 3	1.093 7	1.165 3	1.228 9
80	0.648 9	0.774 4	0.861 6	0.931 4	0.990 9	1.043 6

第5章 低压电器可靠性试验理论与方法

为了测定、验证或提高产品可靠性而进行的试验称为可靠性试验，它是产品可靠性工作的一个重要环节。

通常，对产品进行可靠性试验的目的如下：

(1) 在研制阶段使产品达到预定的可靠性指标。为了使产品能达到预定的可靠性指标，在研制阶段需要对样品进行可靠性试验，以便找出产品在原材料、结构、工艺、环境适应性等方面所存在的问题，而加以改进，经过反复试验与改进，就能不断地提高产品的各项可靠性指标，达到预定的要求。

(2) 在产品研制定型时进行可靠性鉴定。新产品研制定型时，要根据产品标准（或产品技术条件）进行鉴定试验，以便全面考核产品是否达到规定的可靠性指标。

(3) 在生产过程中控制产品的质量。为了稳定地生产产品，有时需要对每个产品都要按产品技术条件规定的项目进行可靠性试验。此外还需要逐批或按一定期限进行可靠性抽样试验。通过对产品的可靠性试验可以了解产品质量的稳定程度。若因原材料质量较差或工艺流程失控等原因造成产品质量下降，在产品的可靠性试验中就能反映出来，从而可及时采取纠正措施使产品质量恢复正常。

(4) 对产品进行筛选以提高整批产品的可靠性水平。合理的筛选可以将各种原因（如原材料有缺陷、工艺措施不当、操作人员疏忽、生产设备发生故障和质量检验不严格等）造成的早期失效的产品剔除掉，从而提高整批产品的可靠性水平。

(5) 研究产品的失效机理。通过产品的可靠性试验（包括模拟试验和现场使用试验）可以了解产品在不同环境及不同应力条件下的失效模式与失效规律。通过对失效产品所进行的分析可找出引起产品失效的内在原因（即失效机理）及产品的薄弱环节，从而可以采取相应的措施来提高产品的可靠性水平。

1 可靠性试验的种类

根据试验的地点、试验的项目、可靠性工作的阶段、施加的应力强度、对可靠性的影响、试品破坏情况、试验规模及抽样方案的类型等，可将可靠性试验分成很多种类，如下所示。

- (1) 按试验地点分类。
 - 1) 实验室试验。
 - 2) 现场试验。
- (2) 按试验项目分类。
 - 1) 环境试验。
 - 2) 筛选试验。
 - 3) 寿命试验。
- (3) 按可靠性工作阶段分类。
 - 1) 研制试验。
 - 2) 鉴定试验。
 - 3) 验收试验。
- (4) 按施加应力的强度分类。
 - 1) 正常工作试验。

- 2) 过负荷试验。
- 3) 加速寿命试验。
- (5) 按对可靠性的影响分类。
 - 1) 可靠性测定试验。
 - 2) 可靠性验证试验。
 - 3) 可靠性增长试验。
- (6) 按试品破坏情况分类。
 - 1) 破坏性试验。
 - 2) 非破坏性试验。
- (7) 按试验规模分类。
 - 1) 全数试验。
 - 2) 抽样试验。
- (8) 按抽样方案类型分类。
 - 1) 定时或定数截尾试验。
 - 2) 序贯截尾试验。

2 可靠性筛选试验

可靠性筛选试验一般是指为剔除早期失效产品而进行的试验。通常说的筛选就是指将坏的、不符合规定要求的产品通过各种方法予以淘汰和剔除；而将好的、合格的产品选出留下。

2.1 特点

可靠性筛选的效果可用筛选效率、筛选损耗率和筛选淘汰率三个参数来衡量，它们的定义如下

$$\text{筛选效率 } \omega = \frac{\text{剔除次品数}}{\text{实际次品数}}$$

$$\text{筛选损耗率 } L = \frac{\text{好品损坏数}}{\text{实际好品数}}$$

$$\text{筛选淘汰率 } Q = \frac{\text{剔除次品数}}{\text{进行筛选的产品总数}}$$

理想的可靠性筛选应使 $\omega \approx 1$, $L \approx 0$ ，这样才能达到可靠性筛选的目的。Q值的大小反映了这些产品在生产过程中存在问题的大小。Q值越大，表示这批产品筛选前的可靠性越差，亦即生产过程中所存在的问题越大，产品的成品率越低。

2.2 项目、筛选应力以及筛选试验时间（或操作次数）的确定

通过长时期的可靠性试验与筛选试验，并对失效产品进行失效分析，可以总结出产品的失效机理及筛选试验项目与产品失效机理间的关系，从而确定筛选试验项目。在确定筛选项目时，应注意尽可能采用非破坏性筛选。

筛选试验项目确定后，还要通过摸底试验获得产品失效分布规律，从而确定筛选试验的应力水平和筛选试验时间（或操作次数）。

3 可靠性环境试验

环境条件对产品内部潜在的故障因素起着刺激作用，它是导致产品形成故障的一种因子。为了分析评价环境条件对

产品性能的影响而进行的试验称为环境试验。电工产品在储存、运输和使用过程中可能遇到的各种常见的环境条件，如表 4.5-1 所示。

表 4.5-1 常见的环境条件

气候条件	温度、湿度、气压、风、雨、冰、雪、霜、露、沙尘、盐雾、游离气体、腐蚀性气体等
机械条件	振动、冲击、碰撞、离心加速度、跌落、摇摆、静力负荷、失重、爆炸、冲击波等
生物条件	霉菌、昆虫、齿类动物等
辐射条件	太阳辐射、核辐射、紫外线辐射、宇宙射线等
电磁条件	电场、磁场、闪电、雷击、电晕放电等

环境试验可分为现场试验和模拟试验两大类。在使用现场进行的试验称为现场试验，通过现场试验可以真实地反映产品在实际使用条件下的可靠性。在试验室里进行的试验称为模拟试验。

由表 4.5-1 可以看出，影响产品性能的环境条件很多，但并不是所有的环境条件都要进行模拟试验，有些环境条件对产品的可靠性影响很小，所以只要对产品可靠性影响大的一些环境条件（主要是气候条件和机械条件）进行模拟试验。国际电工委员会（IEC）于 1960 年成立了电子元件和设备的环境试验规程技术委员会（TC50），到目前为止已在环境试验方面制定了不少标准。IEC 还于 1972 年成立了环境条件分类技术委员会（TC75），它也颁布了一些标准。美国、日本等工业发达国家还制定了许多关于电子设备和电气设备的环境试验方法的标准。

20 世纪 50 年代中后期开始，我国各工业部也都开展了环境条件与环境试验的标准化工作。1980 年成立了全国电工、电子产品环境条件与试验标准化技术委员会，并制定了环境条件与试验的国家标准。到目前为止，已制定并颁布了 GB/T 2423.1—2001《电工电子产品环境试验第 2 部分：试验方法试验 A：低温》等几十项环境试验标准。

4 可靠性测定试验与可靠性验证试验

按 GB 5080.1—1986《设备可靠性试验总要求》中的规定，设备（指电子、电工及机械产品，既可指元件，也可指装置）可靠性试验分为可靠性测定试验和可靠性验证试验。

4.1 可靠性测定试验

可靠性测定试验是指测定设备可靠性特征值的试验，可靠性测定试验通常是用来提供可靠性数据的，它适用于还没有定量地规定可靠性要求的产品，通过可靠性测定试验可以评定产品所达到的可靠性水平。

4.2 可靠性验证试验

可靠性验证试验是指验证设备可靠性特征值是否符合规定的可靠性要求的试验，可靠性验证试验通常是订货方接收产品的条件之一。

4.2.1 产品的可靠性要求

某一产品的可靠性要求，应采用从整个系统考虑而确定的并便于应用的指标（失效率值、平均寿命值、可靠寿命值等）来表示。

4.2.2 试验条件的选择与确定

(1) 确定工作及环境试验条件，包括负载条件、电源条件及操作方法等。

(2) 确定试验期间对产品应采取的预防性维护措施。

(3) 确定试验前的试品准备，包括受试产品的测试、调整及校准等。

在试验过程中，如果必须考虑多种工作条件、环境条件和维修条件，则在详细的可靠性试验方案中应该有一个试验周期图，用以表明试验周期中工作环境和预防性维护条件的持续时间、时间间隔，以及它们之间的相互关系。

4.2.3 试验地点的确定

实验室试验的优点是试验条件可以限定和控制，试验结果具有可比性。此外，实验室试验能更好地监测受试产品的性能和显示受试产品的失效。在很多情况下，实验室的试验条件可以准确地按使用的极限条件来设计。

现场试验的优点是可以提供更现实的试验结果且只要较少的试验设施，其试验费用也比相应的实验室实验费用低，受试产品可以按正常条件工作。现场试验的缺点是不可能 在严格控制的条件下进行试验。

4.2.4 试验方案的确定

在恒定失效率的情况下可采用下列两种类型的试验方案。

(1) 截尾序贯试验方案。在试验期间，对受试产品进行连续的或短间隔的监测，并将累积的试验时间和失效数与规定的判据进行比较，以确定是否接收、拒收，或是应继续进行试验。

(2) 定时或定数截尾试验方案。在试验期间，对受试产品进行连续的或短间隔的监测，若累积的试验时间达到了预定的试验时间，而失效数未达到预定的失效数，则判为接收；若累积的试验时间未达到预定的试验时间，而失效数达到了预定的失效数，则判为拒收。

上述两种类型的试验方案在经济性及管理方面的优缺点如下。

截尾序贯试验方案的优点是：

- (1) 作出判决所需要的平均失效数最少。
- (2) 作出判决所要求的平均累积试验时间最少。

截尾序贯试验方案的缺点是：

(1) 失效数及与之有关的试品费用的变动幅度比类似的定时或定数截尾试验方案大，从而带来安排试品、试验设备和人力等管理方面的问题。

(2) 最大累积试验时间及失效数可能会超过相应的定时或定数截尾试验方案。

定时或定数截尾试验方案的优点是：

(1) 最大累积试验时间是固定的，因此在试验之前就可以确定试验设备及人力的最大需要量。

(2) 试验之前能确定试品的最大数量。

定时或定数截尾试验方案的缺点是：

(1) 平均失效数和平均累积试验时间都会超过相应的截尾序贯试验方案。

(2) 无论产品好坏，都要达到预定的累积试验时间或失效数才能作出判决，而相应的截尾序贯试验方案作出这种判决一般要快些。

4.2.5 试品的失效及分类

对于需要监测的每个参数，均应规定可接受的极限范围，当被测的任何一个参数永久地或间断地超出这种极限范围时，就应认为试品失效。

由于测量错误或外部测试设备失效而产生的试品失效现象不应认为是试品的失效，而其他所有的失效都应认为是试品的失效。

试品的失效可分为非相关失效和相关失效两类,非相关失效包含以下几种失效。

(1) 从属失效。若一个产品的失效是由于另一个产品失效直接或间接地引起的,则这种失效称为从属失效。

(2) 误用失效。误用失效指对试品施加的应力超过其规定应力而造成的失效,例如试验的严酷程度超过了对试品所规定的应力,这可能是因试验或维修人员的粗心操作所造成。

(3) 修改设计可以清除的失效。它指在试验中早期发现的可通过采取更改设计或采取其他矫正措施即可清除的一类失效。

除了上述属于非相关失效范畴的失效,均应认为是试品的相关失效。在对可靠性验证试验进行判决时,应把试验期间或试验结束时观测到的试品的所有相关失效均计算在内。

在可靠性验证试验的某些情况下应规定“需要立即作出拒收判决的失效”,即当这种失效一旦发生,无论其失效数是多少都不再考虑正常的接收或拒收判决而立即作出拒收的判决。产品可靠性试验方案中应规定这类失效的定义。例如,对产品的使用、维修人员或有关人员会造成危险或不安全条件的试品失效或可能造成巨大物资损失的失效均属这类失效。

5 可靠性寿命试验(正常寿命试验)

若按施加的应力水平的高低来划分,寿命试验可分为正常寿命试验(简称寿命试验)和加速寿命试验。正常寿命试验是指对产品施加正常应力(产品标准中规定的额定应力)水平的寿命试验。加速寿命试验是指对产品施加的应力超过正常应力水平的寿命试验。

本节主要讨论正常寿命试验。

为了以下目的,在下列场合需要进行可靠性寿命试验。

(1) 为了了解和确定产品的失效分布类型。

(2) 为了确定产品的各项可靠性特征量值(例如,失效率、平均寿命、可靠寿命及中位寿命等)。

(3) 对于已投入生产的产品或新研制的产品,为了了解其可靠性水平而进行的所谓可靠性摸底试验。

(4) 新产品研制和定型时所进行的失效率(可靠性)等级的定级试验。

(5) 产品的失效率(可靠性)等级的升级试验和维持试验。

5.1 样品数量的确定和抽样方法

对于失效率等级定级试验、失效率等级的升级试验及失效率等级的维持试验,其样品数量应根据产品标准中所规定的抽样表来确定。对于可靠性摸底试验,以及为了确定产品的失效分布类型和各项可靠性特征量值而进行的寿命试验,其样品数量没有明确的规定,当样品数较多时,对失效分布类型及各项可靠性特征量所作的估计也比较精确,但试验费用及试验工作量较大。而当样品数较少时,虽可减少试验费用及工作量,但所作估计的精确性将降低,所以样品数量的多少既要保证统计分析的正确性,又要考虑到寿命试验的代价不能太大。一般来说,当产品的成本及试验费用较低时,样品数量应多些(最好不低于30个)。若产品的成本或试验费用很高,则样品数量可以适当减少。

样品必须在筛选试验和出厂试验合格的一批产品中随机地抽取。

5.2 失效判据与试验中应监测的参数

失效判据是判断产品是否失效的依据,所以在产品标准中应予以明确规定,严格地说,产品在寿命试验过程中,各项技术指标都应符合产品标准的规定,所以对产品的各项技术指标(或参数)都应进行监测,但这会使试验设备太复杂,试验工作量太大,所以一般只对一些关键的参数进行监测,而对其他技术参数仅在寿命试验结束后进行测量。

5.3 试验截止时间的确定

寿命试验可分为完全寿命试验、定数截尾寿命试验和定时截尾寿命试验。对于鉴定试验中的失效率等级定级试验、失效率等级升级试验、失效率等级的维持试验,一般采用截尾寿命试验;对于为确定产品的失效分布类型所进行的寿命试验,最好作完全寿命试验;对于可靠性摸底试验,以及为确定产品可靠性特征量值所进行的寿命试验,可采用截尾寿命试验,但失效数 r 最好达到样品总数的60%左右为宜。

6 加速寿命试验

加速寿命试验就是在不改变产品失效机理的条件下,用加大应力的方法所进行的寿命试验。由于加大了应力,使产品加速失效,从而缩短了试验时间。采用加速寿命试验可以用较少的样品在较短的时间内结束试验,根据试验所得结果可推算出产品在正常(额定)应力水平下的可靠性特征量值。

6.1 加速寿命试验的分类

加速寿命试验按施加应力的方法大致可分为三种类型,即恒定应力加速寿命试验、步进应力加速寿命试验和序进应力加速寿命试验。恒定应力加速寿命试验是把投试样品分成若干组,在高于正常应力水平的几个恒定应力水平下,分别对各组样品进行寿命试验。步进应力加速寿命试验是指样品所加的应力水平随时间按阶梯形逐步提高的寿命试验。序进应力加速寿命试验是指所加应力水平随时间等速连续增高的寿命试验。

恒定应力加速寿命试验是最常用的加速寿命试验方法。下面主要介绍这种试验方法的基本原理及其试验结果的图分析法。

6.2 恒定应力加速寿命试验的基本原理

一台交流接触器分断的电流值越大时,电弧能量越大,触头的电磨损量也越大,接触器的电寿命就越低;反之,当这台交流接触器分断的电流值较小时,接触器的电寿命就较长。若该交流接触器分断电流 I 采用 I_1, I_2, I_3 及 I_4 (均比额定分断电流 I_N 高)四种不同水平时,其电寿命分别为 t_1, t_2, t_3 及 t_4 ,则可画出分断电流 I 与电寿命间的关系曲线,如图4.5-1所示。

图4.5-1中,A,B,C,D四点所代表的数(t_1, I_1), (t_2, I_2), (t_3, I_3), (t_4, I_4)显然不能通过同一台交流接触器的寿命试验获得,而且由于产品寿命的随机性也不能用一台产品进行一个应力水平下的寿命试验,一般应在每个应力水平下各取若干个样品进行寿命试验,并根据其试验结果来确定其失效分布类型,然后确定该应力水平下的可靠性寿命参数值。

6.3 恒定应力加速寿命试验方法

(1) 加速变量的选择。在选择加速变量时,首先要考虑

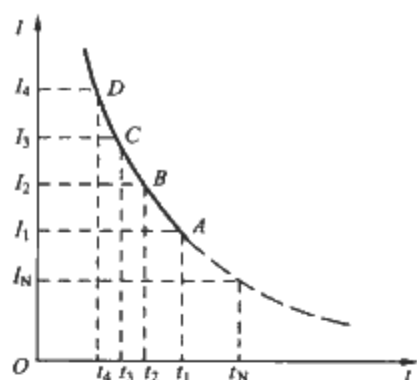


图 4.5-1 交流接触器的加速寿命曲线

对主要失效机理有明显影响的那种应力条件。半导体器件的加速寿命试验常选择温度作为加速变量。对于交流接触器而言，可以考虑选择触头的分断电流作为电寿命加速试验的加速变量。

(2) 加速变量的应力水平个数的选择。为了通过加速寿命试验能准确地推算出正常应力水平下的产品寿命，一般要对加速变量选取 k 个应力水平分别进行寿命试验。一般 k 不得小于 3，最好 $k \geq 4$ 。

(3) 加速变量的应力水平的选择。为叙述方便，用符号 S 表示加速变量，各个应力水平下的加速变量值分别记作 S_1, S_2, \dots, S_k ($S_1 < S_2 < \dots < S_k$)。例如，选择分断电流作为电寿命加速试验的加速变量，并选择其应力水平分别为额定电流 I_N 的 1.5 倍、3 倍、4.5 倍及 6 倍，则 $S_1 = 1.5I_N, S_2 = 3I_N, S_3 = 4.5I_N, S_4 = 6I_N$ 。

最低应力水平下的加速变量值 S_1 应尽可能接近正常应力水平下的加速变量值，这样可使由试验结果所推算出的正常应力水平下的产品寿命具有较高的准确度。 S_k 应尽可能比正常应力水平下的加速变量值高得多些，以缩短试验时间，但是必须保证产品在 $S = S_k$ 时的失效机理与在正常应力水平下的失效机理相同，即必须保证应力水平提高后失效机理不变。

其他应力水平下的加速变量值可按以下原则确定。当产品寿命与加速变量间满足阿伦尼斯方程时

$$\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2} = \frac{1}{S_2} - \frac{1}{S_3} = \dots = \frac{1}{S_{k-1}} - \frac{1}{S_k} = \frac{\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_k}}{k-1} \quad (4.5-1)$$

当产品寿命与加速变量间满足逆幂律方程时

$$\lg S_k - \lg S_{k-1} = \lg S_{k-1} - \lg S_{k-2} = \dots = \lg S_2 - \lg S_1 = \frac{\lg S_k - \lg S_1}{k-1} \quad (4.5-2)$$

(4) 确定投试样品的数量。整个加速寿命试验由 $S = S_1, S_2, \dots, S_k$ 时的各个寿命试验组成。设 $S = S_1$ 时寿命试验的样品数为 n_1 ， $S = S_2$ 时寿命试验的样品数为 n_2 ， $S = S_k$ 时寿命试验的样品数为 n_k ，则整个加速寿命试验总共投试样品数 $n = n_1 + n_2 + \dots + n_k$ 。通常，可取 $n = n_1 = n_2 = \dots = n_k$ ，各个应力水平下寿命试验的样品数也可以不相等，但要保证 n_1 和 n_k 是其中最多的样品数。

(5) 投试样品的抽取方法。投试样品必须在同一批产品中随机地抽取，一般在一批产品中先随机抽取 n 个样品，然后将这 n 个样品再随机地分成 k 组，各组的样品数分别为 n_1, n_2, \dots, n_k 。

(6) 寿命试验的停止时间。应力水平较高（如 $S = S_k$ 等）时的寿命试验，费时较少，一般都采用完全寿命试验；而在应力水平较低（ $S = S_1$ 及 $S = S_2$ ）时的寿命试验，试验

时间较长，有时采用截尾寿命试验。通常， $S = S_1$ （或 $S = S_2$ ）时，寿命试验的试品失效个数 r_1 （或 r_2 ）与试品 n_1 （或 n_2 ）之比 r_1/n_1 （或 r_2/n_2 ）最低也要达到 30%。

6.4 恒定应力加速寿命试验的图分析法

根据不同应力水平下的寿命试验结果，应用失效分布类型的图检验法，可以确定其失效分布类型，从而可求得产品在不同应力水平下的可靠性寿命参数。然后在单边对数坐标纸（当选择温度作为加速变量时）或双边对数坐标纸（当选择电流或电压作为加速变量时）上描点，如果能用一条直线（即加速寿命直线）拟合，则可推算出正常应力水平下的可靠性寿命参数，这种方法称为加速寿命试验的图分析法。下面以温度作为加速变量、寿命服从威布尔分布为例，介绍加速寿命试验的图分析法。

为叙述方便，假设应力水平个数 $k = 4$ ，此时，图分析法的步骤如下。

(1) 在威布尔概率纸上画出各温度水平下的寿命分布直线。根据温度 $T = T_1$ 时的寿命试验数据 $(t_1)_1, (t_2)_1, \dots, (t_{n_1})_1$ ； $T = T_2$ 时的寿命试验数据 $(t_1)_2, (t_2)_2, \dots, (t_{n_2})_2$ ； $T = T_3$ 时的寿命试验数据 $(t_1)_3, (t_2)_3, \dots, (t_{n_3})_3$ ； $T = T_4$ 时的寿命试验数据 $(t_1)_4, (t_2)_4, \dots, (t_{n_4})_4$ ；求得与上述寿命数据相对应的累积失效概率值，在威布尔概率纸上描点并分别用直线拟合，可得到回归直线 L_1, L_2, L_3, L_4 ，这些直线即为各温度水平下的寿命分布直线，如图 4.5-2 所示。

(2) 估计各温度水平下的特征寿命。在图 4.5-2 中， $T = T_1$ 时的寿命分布直线 L_1 与 X 坐标轴的交点向下引垂线，该垂线与 t 尺交点的读数即为 $T = T_1$ 时的特征寿命的估计值 $\hat{\eta}_1$ ，与此相似，可求得其他各温度水平（ T_2, T_3, T_4 ）下的特征寿命的估计值 $\hat{\eta}_2, \hat{\eta}_3, \hat{\eta}_4$ ，如图 4.5-2 所示。

(3) 在单边对数坐标纸上绘制加速寿命直线。在单边对数坐标纸上，以 $1/T$ 为横坐标，寿命 t 为纵坐标，按 $(1/T_1, \hat{\eta}_1), (1/T_2, \hat{\eta}_2), (1/T_3, \hat{\eta}_3), (1/T_4, \hat{\eta}_4)$ 描点，并用直线拟合，得加速寿命直线 L_j ，如图 4.5-3 所示。

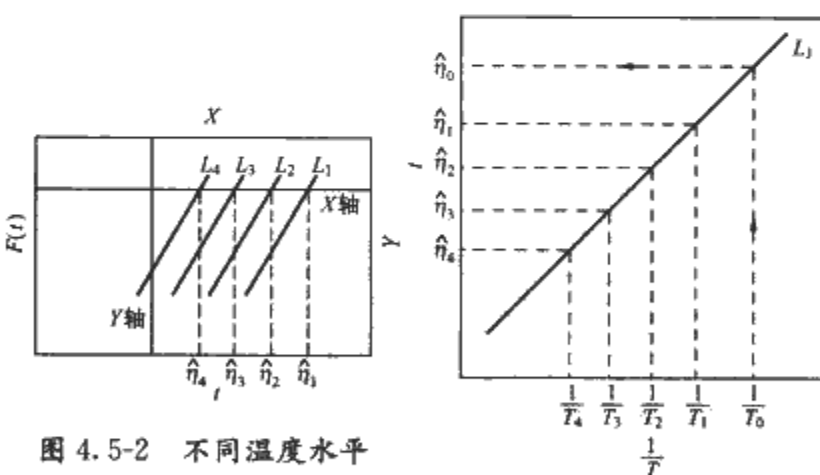


图 4.5-2 不同温度水平 (T_1, T_2, T_3, T_4) 下的寿命分布直线

图 4.5-3 单边对数坐标纸上配置加速寿命直线

(4) 推算正常温度水平 (T_0) 下的特征寿命 $\hat{\eta}_0$ 。将图 4.5-3 中的加速寿命直线延长，并在横坐标轴上取读数等于 $1/T_0$ 的一点向上作垂直线，该垂线与加速寿命直线相交，由交点向左作水平线，该水平线与 t 坐标轴交点的读数即为 $\hat{\eta}_0$ 。

(5) 推算正常温度水平 (T_0) 下的寿命分布。求出图 4.5-2 中各温度水平下寿命分布（即威布尔分布）的形状参

数的估计值 $\hat{m}_1, \hat{m}_2, \hat{m}_3, \hat{m}_4$ ，再按式 (4.5-3) 求出正常温度水平 (T_0) 下寿命分布的形状参数的估计值 \hat{m}_0

$$\hat{m}_0 = \frac{1}{n}(n_1 \hat{m}_1 + n_2 \hat{m}_2 + n_3 \hat{m}_3 + n_4 \hat{m}_4) \quad (4.5-3)$$

式中： n 为总试品数， $n=n_1+n_2+n_3+n_4$ 。

在威布尔概率纸的 Y 尺上取读数等于 \hat{m}_0 的 A 点，由 A 点向左作水平线，交 Y 坐标轴于 B 点，过 B 点和 m 的估计点作直线 L ，再在 t 尺上取读数等于 $\hat{\eta}_0$ 的一点 C，由 C 点向上作垂线交 X 坐标轴于 D 点，过 D 点作平行于直线 L 的直线 L_0 ，则直线 L_0 即为所求的正常温度水平 (T_0) 下的寿命分布直线，如图 4.5-4 所示。

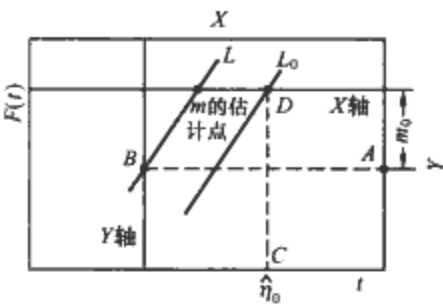


图 4.5-4 正常温度水平 (T_0) 下的寿命分布直线

(6) 推算正常温度水平下的各可靠性特征量的估计值。根据正常温度水平 (T_0) 下的寿命分布直线 (图 4.5-4 中的

L_0)，推算出正常温度水平下的各可靠性特征量 (如平均寿命、寿命标准离差、可靠寿命、中位寿命等) 的估计值。

(7) 推算加速系数。产品寿命服从威布尔分布、温度作为加速变量和温度水平为 T_i 时的加速系数 τ_i 是指正常温度水平 (T_0) 下的特征寿命 η_0 与该温度水平 T_i 下的特征寿命 η_i 的比值，即

$$\tau_i = 10^{(\frac{b}{T_0} - \frac{b}{T_i})} = 10^{b(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_i})} \quad (4.5-4)$$

式 (4.5-4) 中系数 b 的确定方法是：先由 $1/T_1$ 及 $1/T_4$ 在加速寿命直线 (见图 4.5-3) 上查出相应的特征寿命 η_1 及 η_4 ，再根据式 (4.5-5) 即可求得

$$b = \frac{T_1 T_4}{T_4 - T_1} (\lg \eta_1 - \lg \eta_4) = \frac{T_1 T_4}{T_4 - T_1} \lg \frac{\eta_1}{\eta_4} \quad (4.5-5)$$

将 T_0, T_i 和由式 (4.5-5) 所求得的 b 值代入式 (4.5-4)，即可求得某一温度水平 T_i 下的加速系数 τ_i 。应该指出， T_i 不应超过加速寿命试验中的最高温度水平，因为温度水平 T_i 太高时，可能使失效机理发生改变，而使所推得的加速系数值不正确。

第6章 低压电器可靠性设计

可靠性设计是考虑产品可靠性的一种设计方法,它的任务是运用可靠性工程的方法,使产品在满足一定条件(如成本、质量、体积、能耗等)下有较高的可靠性,或在保证一定的可靠性水平的条件下使成本较低(或质量较轻、体积较小、能耗较少等)。

产品的可靠性可分为固有可靠性和使用可靠性。固有可靠性主要在设计阶段通过产品的可靠性设计来加以保证,所以产品的可靠性设计是制造厂向用户提供产品质量保证的一个重要环节,一个产品可靠性的 高低在很大程度上取决于产品可靠性设计的好坏。

产品可靠性设计方式一般有以下两种:

(1) 设计时未规定产品的可靠性指标。这种情况下可按常规的设计方法设计出几个方案,然后对各个设计方案的可靠性进行预计,择优定案。

(2) 设计时已预先规定了产品的可靠性指标。这种情况下先将产品的可靠性指标分配至产品的各零部件或所用的电子元器件,然后进行可靠性技术设计(在可靠性技术设计的同时要考虑产品的性能及费用要求),再进行可靠性预计。若预测出的产品可靠性特征量(如可靠度、失效率或平均寿命等)的数值未达到预先规定的产品可靠性指标,则应设法提高产品的可靠性。这时一般应进行可靠性分析,找出系统的可靠性薄弱环节并加以改进,从而使产品的可靠性特征量值达到规定的要求。

上述第一种设计方式一般适用于尚未积累足够的可靠性数据的产品,而对于已积累足够的可靠性数据,能预先规定产品可靠性指标的产品,一般采用第二种设计方式。

由上面两种可靠性设计方式中可以看出,产品可靠性设计的内容主要包括产品的可靠性技术设计、产品的可靠性预计、产品的可靠性分配和产品的可靠性分析等。

1 可靠性预计

可靠性预计是指根据产品所选用的零部件的可靠性数据来测算产品可靠性特征量(如可靠度、失效率或平均寿命等)的值。

可靠性预计的目的如下:

(1) 使设计者及早对新设计产品的可靠性作出估计,看其是否已达到预定指标。若未达到预定指标,则可及早采取措施加以改进;若超过预定指标太多,则可及时调整零部件的可靠性水平,以降低产品的成本。

(2) 可对各种设计方案的可靠性水平进行比较,选出最优方案。

在进行产品的可靠性预计时,必须知道产品的零部件(或所用的电子元器件)的可靠性数据,这些数据主要由实践中统计和积累得来,也可由有关资料及手册查得。

一个产品总是由若干个零部件组成,例如,一个电磁式继电器由电磁系统与触头系统组成,而这两部分又分别由若干零件组成。又如一个电子式时间继电器,它由若干个电子元器件及一个小型电磁继电器组成。所以在进行产品可靠性预计时,可以把产品看成是一个系统,而产品的各个零部件

可看成是组成此系统的各个单元(元件或子系统)。

一个产品(系统)的可靠性,一方面与它的零部件(单元)的可靠性高低有关,另一方面也与这些零部件(单元)工作状态对整个产品工作状态的影响有关,所以在进行产品(系统)的可靠性预计时,一般都要首先建立系统的可靠性模型。系统可靠性模型就是系统可靠性与其各单元可靠性之间的关系。该关系可用产品(系统)的可靠性逻辑框图(简称为可靠性框图)表示,然后根据可靠性框图进行可靠性预计。

1.1 系统的可靠性框图

产品使用时能成功地完成任务的所有组成部分之间相互的依赖关系用框图表示,称为可靠性框图。可靠性框图与一般的电路图或原理接线图不同,它表示系统中各单元间的功能关系,是以单元的正常工作或失效对系统工作状态的影响作为基础,并以正常工作(完成功能)作为出发点所画出的框图。图中每一个方框均表示一个单元(元件或子系统),在系统可靠性框图中,从左到右的任一条通路上的所有单元均正常工作时,该系统就处于正常工作状态,否则系统就处于故障状态。

系统功能框图或系统图与系统可靠性框图既有联系又有区别。系统功能框图是建立系统可靠性框图的基础,但是系统可靠性框图又和系统功能框图存在下述区别:

(1) 可靠性框图只表明各单元在可靠性方面的逻辑关系,并不表明各单元之间的物理上及时间上的关系。因此各单元的排列不像功能框图那样具有严格的顺序。例如,一个电磁继电器由电磁系统和触头系统两个系统组成,显然,只有当这两个子系统均正常工作时,电磁继电器才能正常工作,所以可画出电磁继电器的可靠性框图如图4.6-1所示。



图 4.6-1 电磁继电器的可靠性框图

(2) 某些情况下,组成系统的各单元在物理作用上是平行的,从而在功能框图上各单元是并联关系,但在可靠性框图上则是串联关系。例如,接触器的三相触头在物理作用上是平行的,在可靠性框图上各触头是串联关系。

(3) 同一个系统如果具有多种功能要求,往往在功能框图上不便于分别表示出来,但在可靠性框图上必须表示出所有不同功能要求的各单元的可靠性逻辑关系。

对于一个系统,按其各组成单元的工作状态对系统工作状态的影响可分为串联系统、并联系统、 n 个取 k 系统、串并联系统及复杂系统等。

1.2 串联系统的可靠性预计

1.2.1 串联系统的定义及可靠性框图

若系统中所有单元均正常时,系统才能正常工作(或者说,系统中任一个单元失效,都会导致系统故障),则这个系统称为串联系统,其可靠性框图如图4.6-2所示。电工产品大多可看成串联系统。



图 4.6-2 串联系统的可靠性框图

1.2.2 串联系统的可靠性预计

设第 i 个单元的可靠度为 $R_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, n$)，则具有 n 个单元的串联系统的可靠度为

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (4.6-1)$$

若各单元的寿命均服从指数分布， λ_i 为第 i 个单元的失效率， λ_s 为串联系统的失效率，则

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t\right) = e^{-\lambda_s t} \quad (4.6-2)$$

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (4.6-3)$$

串联系统的平均寿命为

$$MTTF_s = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (4.6-4)$$

若各单元的失效率均相等，即 $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = \lambda$ ，则

$$\lambda_s = n\lambda \quad (4.6-5)$$

$$MTTF_s = \frac{1}{n\lambda} \quad (4.6-6)$$

1.3 并联系统的可靠性预计

1.3.1 并联系统的定义及可靠性框图

若系统中有一个单元正常工作，系统就能正常工作（或者说仅当所有单元全部失效时，才导致系统故障），则这个系统称为并联系统，其可靠性框图如图 4.6-3 所示。

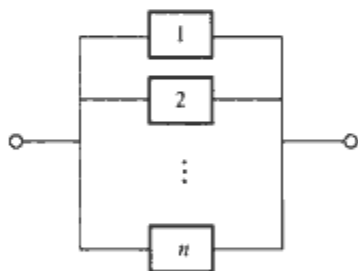


图 4.6-3 并联系统的可靠性框图

1.3.2 并联系统的可靠性预计

(1) 并联系统的可靠度为

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (4.6-7)$$

若 $R_1(t) = R_2(t) = \dots = R_n(t) = R(t)$ ，则

$$R_s(t) = 1 - [1 - R(t)]^n$$

(2) 若各单元的寿命均服从指数分布，即 $R_i(t) = e^{-\lambda_i t}$ ，则

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (4.6-8)$$

并联系统的平均寿命为

$$MTTF_s = \int_0^\infty R_s(t) dt = \int_0^\infty \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \right\} dt \quad (4.6-9)$$

$$MTTF_s = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} - \sum_{1 \leq i < j \leq n} \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j} + \dots + \frac{(-1)^{n-1}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n} \quad (4.6-10)$$

当各单元的失效率均相等，即 $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = \lambda$ 时

$$MTTF_s = \frac{1}{\lambda} \left[C_n^1 - \frac{C_n^2}{2} + \frac{C_n^3}{3} - \dots + (-1)^{n-1} \frac{C_n^n}{n} \right] \quad (4.6-11)$$

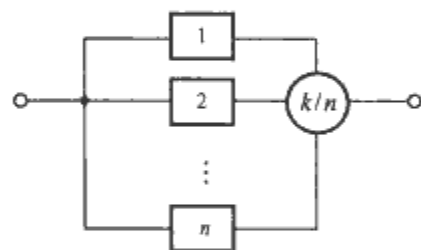
对于两个可靠度相等且寿命服从指数分布（即 $R_1(t) = R_2(t) = e^{-\lambda t}$ ）的单元组成的并联系统，其可靠度 $R_s(t)$ 、密度函数 $f_s(t)$ 、失效率 $\lambda_s(t)$ 及平均寿命 $MTTF_s$ 分别为

$$\begin{aligned} R_s(t) &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t}) \\ &= 1 - (1 - e^{-\lambda t})^2 \\ &= e^{-\lambda t} (2 - e^{-\lambda t}) \\ f_s(t) &= -\frac{dR_s(t)}{dt} = 2\lambda e^{-\lambda t} - 2\lambda e^{-2\lambda t} = 2\lambda e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t}) \\ \lambda_s(t) &= \frac{f_s(t)}{R_s(t)} = \frac{2\lambda e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})}{e^{-\lambda t} (2 - e^{-\lambda t})} = \frac{2\lambda (1 - e^{-\lambda t})}{2 - e^{-\lambda t}} \\ MTTF_s &= \frac{3}{2\lambda} \end{aligned} \quad (4.6-12)$$

由此可见，每个单元的寿命均服从指数分布时，其并联系统的失效率 $\lambda_s(t)$ 却不是常数，而是 t 的函数；但系统平均寿命仍为常数。

1.4 n 个取 k 系统的可靠性预计1.4.1 n 个取 k 系统的定义及可靠性框图

若由 n 个单元组成的系统中有 k 个单元正常工作时系统就能正常工作，则这个系统称为 n 个取 k 系统，其可靠性框图如图 4.6-4 所示。

图 4.6-4 n 个取 k 系统的可靠性框图

例如：一台电动机一般有 4 个地脚螺栓，但实际上只要有其中 3 个螺栓正常工作，电动机就能固定牢靠，所以电动机的地脚螺栓部分就是一个 $n=4, k=3$ 的 n 个取 k 系统。

1.4.2 n 个取 k 系统的可靠性预计

对于 n 个取 k 系统，系统正常工作的概率（即系统的可靠度）应等于下述概率之和： n 个单元均正常工作的概率， $n-1$ 个单元正常工作的概率，……， k 个单元正常工作的概率。若各单元正常工作的概率（即可靠度）相同，均为 $R(t)$ ，则系统可靠度为

$$R_s(t) = \sum_{i=k}^n C_n^i [R(t)]^i [1 - R(t)]^{n-i} \quad (4.6-13)$$

若各单元的寿命均服从指数分布，即 $R(t) = e^{-\lambda t}$ ，式中 λ 为各单元的失效率，则系统可靠度为

$$R_s(t) = \sum_{i=k}^n C_n^i e^{-i\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^{n-i} \quad (4.6-14)$$

系统的平均寿命为

$$MTTF_s = \int_0^\infty \left[\sum_{i=k}^n C_n^i e^{-i\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^{n-i} \right] dt \quad (4.6-15)$$

用归纳法可证明 $C_n^i \int_0^\infty [e^{-i\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^{n-i}] dt = \frac{1}{i\lambda}$ ，将此关系代入式 (4.6-15)，可得

$$MTTF_s = \sum_{i=k}^n \frac{1}{i\lambda} = \frac{1}{k\lambda} + \frac{1}{(k+1)\lambda} + \dots + \frac{1}{n\lambda} \quad (4.6-16)$$

1.5 串并联系统的可靠性预计

1.5.1 串并联系统的定义及可靠性框图

既有串联方式也有并联方式组成的系统称为串并联系统。图 4.6-5 为由 5 个单元组成的串并联系统的可靠性框图。

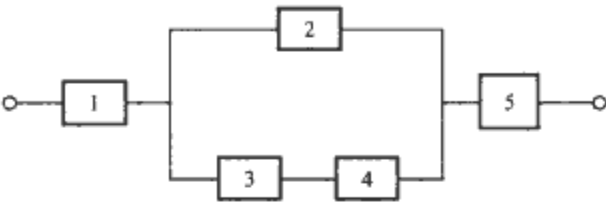


图 4.6-5 串并联系统的可靠性框图

1.5.2 串并联系统的可靠性预计

(1) 简化方法计算系统可靠度。电路中某些部分采用冗余设计的电器产品就是一个串并联系统，任一个串并联系统总可以看成是由一些子系统（串联方式的、并联方式的子系统）组合而成的。进行串并联系统的可靠性预计时，只要用上面所介绍的预计方法求出子系统的可靠度，即可使串并联系统的可靠性框图逐步简化，最后可简化为一个简单系统（串联系统或并联系统），从而求出整个系统的可靠度。

(2) 用分割-联接组合法估计系统可靠度的范围。所谓一个分割组合就是绘一条线穿过系统可靠性框图中的一些方框，这些方框失效会引起系统失效；所谓一个联接组合就是绘一条线穿过系统可靠性框图中的一些方框，这些方框正常工作时就能使系统正常工作。

系统可靠度 R_s 的范围可由式 (4.6-17) 求得。

$$1 - \sum_{i=1}^N \prod_{j=1}^{k_i} (1 - R_{ij}) < R_s < \sum_{i=1}^T \prod_{j=1}^{m_i} R_{ij} \quad (4.6-17)$$

式中： N 为分割组合数； k_i 为第 i 条分割线上的单元数； T 为联接组合数； m_i 为第 i 条联接线上的单元数。

系统越复杂，系统可靠度 R_s 的计算也越复杂，而采用上述分割-联接法可以较快地求得一个 R_s 的近似值（范围）。

1.6 复杂系统的可靠性预计

1.6.1 复杂系统的定义及可靠性框图

在实际问题中，还有一类属于既非串联又非并联，并很难简化为简单的串并联系统的复杂网络系统，称为复杂系统。

例如图 4.6-6 为一个复杂系统的可靠性框图，其图形与电桥相像故称为桥式系统。

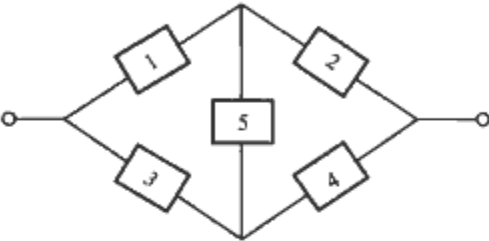


图 4.6-6 桥式系统的可靠性框图

1.6.2 复杂系统的可靠性预计

1.6.2.1 真值表法（状态枚举法）

设系统由 n 个单元组成，各单元及系统若工作正常，则用“1”表示，用 m 表示系统状态取“1”的个数；若处于故障状态，则用“0”表示， l 表示系统状态取“0”的个数。则系统状态组合数 N 为

$$N = m + l = 2^n$$

系统可靠度为系统状态 S_i 取“1”的概率之和，即

$$R_s = \sum_{i=1}^m P(S_i = 1) \quad (4.6-18)$$

例如：对于图 4.6-6 所示的桥式系统，很难简化为简单的串并联系统，当已知各单元的可靠度 R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 时，可用真值表方法求其系统可靠度 R_s 。

将系统中 5 个单元所有情况列于表 4.6-1。

表 4.6-1 真 值 表

序 号	单元 1 $R_1=0.8$	单元 2 $R_2=0.7$	单元 3 $R_3=0.8$	单元 4 $R_4=0.7$	单元 5 $R_5=0.9$	系统状态	概 率
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	1	0	
3	0	0	0	1	0	0	
4	0	0	0	1	1	0	
5	0	0	1	0	0	0	
6	0	0	1	0	1	0	0.003 36
7	0	0	1	1	0	1	
8	0	0	1	1	1	1	
9	0	1	0	0	0	0	
10	0	1	0	0	1	0	
11	0	1	0	1	0	0	0.030 24
12	0	1	0	1	1	0	
13	0	1	1	0	0	0	
14	0	1	1	0	1	1	
15	0	1	1	1	0	1	
16	0	1	1	1	1	1	0.070 56
17	1	0	0	0	0	0	0.030 24
18	1	0	0	0	1	0	
19	1	0	0	1	0	0	
20	1	0	0	1	1	1	
21	1	0	1	0	0	0	
22	1	0	1	0	1	0	0.013 44
23	1	0	1	1	0	1	

续表

序 号	单元 1 $R_1=0.8$	单元 2 $R_2=0.7$	单元 3 $R_3=0.8$	单元 4 $R_4=0.7$	单元 5 $R_5=0.9$	系统状态	概 率
24	1	0	1	1	1	1	0.120 96
25	1	1	0	0	0	1	0.003 36
26	1	1	0	0	1	1	0.030 24
27	1	1	0	1	0	1	0.007 84
28	1	1	0	1	1	1	0.070 56
29	1	1	1	0	0	1	0.013 44
30	1	1	1	0	1	1	0.120 96
31	1	1	1	1	0	1	0.031 36
32	1	1	1	1	1	1	0.282 24

显然，真值表中的组合数为 32，它等于以 2 为底，以单元数 5 为指数的幂。表 4.6-1 中序号为 7 时，单元 3 和 4 正常，1，2，5 不正常，此时系统能正常工作，其正常工作概率为 $R_3R_4(1-R_1)(1-R_2)(1-R_5)$ 。

若图 4.6-6 中 $R_1=0.8$ ， $R_2=0.7$ ， $R_3=0.8$ ， $R_4=0.7$ ， $R_5=0.9$ ，则序号 7 时系统正常工作的概率为 $0.8 \times 0.7 \times (1-0.8) \times (1-0.7) \times (1-0.9)=0.003\ 36$ ，依此可求得系统状态为 1 时的各概率（列于表 4.6-1 中）。将表 4.6-1 中所有系统正常情况的概率相加，即可得系统可靠度 R_s 。（ $R_s=0.866\ 88$ ）。

1.6.2.2 应用布尔代数计算法

（1）布尔代数的基本关系式。布尔函数是指布尔变量 x_1, x_2, x_3, \dots 进行并（ \cup ）、交（ \cap ）、非（ $-$ ）等运算所得的关系式 $f(x_1, x_2, x_3, \dots)$ ，其中布尔变量 x_1, x_2, x_3, \dots 的取值只限于 0 或 1，而不取其他值，因此，布尔函数值也只限于 0 或 1。

布尔代数的基本关系式见表 4.6-2。

表 4.6-2 布尔代数的基本关系式	
交换律	$x_1+x_2=x_2+x_1$ $x_1x_2=x_2x_1$
结合律	$x_1+(x_2+x_3)=(x_1+x_2)+x_3$ $x_1(x_2x_3)=(x_1x_2)x_3$
吸收律	$(x_1+x_2)x_1=x_1$ $x_1+x_1x_2=x_1$
分配律	$x_1(x_2+x_3)=x_1x_2+x_1x_3$ $x_1+x_2x_3=(x_1+x_2)(x_1+x_3)$
幂等律	$x_1+x_1=x_1$ $x_1x_1=x_1$
互补性	$x_1+\bar{x}_1=1$ $x_1\bar{x}_1=0$
狄·摩根定理	$\overline{x_1+x_2}=\bar{x}_1\bar{x}_2$ $\overline{x_1x_2}=\bar{x}_1+\bar{x}_2$

（2）展开定理。设 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，令 $x_i=1$ 时的上述布尔函数为 f_1 ； $x_i=0$ 时的上述布尔函数为 f_0 ，则对于任意布尔变量 x_i ，布尔函数 y 可以展开为

$$y=f_1x_i+f_0\bar{x}_i \tag{4.6-19}$$

此定律称为加法形展开定理。

（3）应用展开定理计算桥式系统的可靠度。若图 4.6-6 中单元 1，2，3，4，5 分别用布尔变量 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 表示，则该桥式系统的布尔函数为

$$y=f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \tag{4.6-20}$$

将式（4.6-20）对 x_5 展开，可得

$$y=x_5f_1+\bar{x}_5f_0 \tag{4.6-21}$$

式中： f_1 为式（4.6-20）中 $x_5=1$ 时的布尔函数，也可表示为 $f(x_1, x_2, x_3, x_4, 1)$ ； f_0 为式（4.6-20）中 $x_5=0$ 时的布尔函数，可表示为 $f(x_1, x_2, x_3, x_4, 0)$ 。

所以式（4.6-21）可写为

$$y=x_5f(x_1, x_2, x_3, x_4, 1)+\bar{x}_5f(x_1, x_2, x_3, x_4, 0) \tag{4.6-22}$$

式中 $f(x_1, x_2, x_3, x_4, 1)$ 表示 x_5 始终为 1（即单元 5 不会发生故障）的布尔函数，所以它可用图 4.6-7 所示的可靠性框图表示。

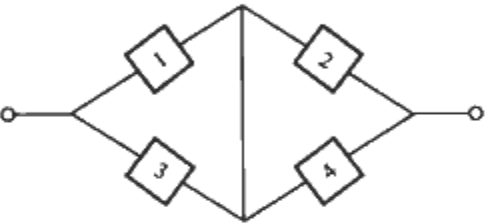


图 4.6-7 单元 5 始终正常时桥式系统的可靠性框图

由逻辑关系可得出

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4, 1)=(x_1+x_3)(x_2+x_4) \tag{4.6-23}$$

同样， $f(x_1, x_2, x_3, x_4, 0)$ 表示 x_5 始终为 0（即单元 5 总处于故障状态）的布尔函数，所以它可用图 4.6-8 所示的可靠性框图表示。

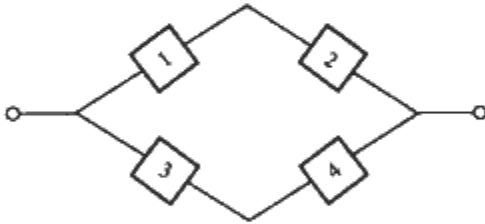


图 4.6-8 单元 5 始终故障时桥式系统的可靠性框图

由逻辑关系可得出

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4, 0)=x_1x_2+x_3x_4 \tag{4.6-24}$$

将式（4.6-23）及式（4.6-24）代入式（4.6-22），可得

$$y=x_5(x_1+x_3)(x_2+x_4)+\bar{x}_5(x_1x_2+x_3x_4) \tag{4.6-25}$$

显然桥式系统的可靠度 R_s 即为布尔函数 y 的值等于 1 的概率。若单元 1，2，3，4，5 正常工作，分别用事件 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 表示，系统正常用事件 A_s 表示，则式（4.6-25）也可用事件间关系表示

$$A_s=A_5(A_1+A_3)(A_2+A_4)+\bar{A}_5(A_1A_2+A_3A_4) \tag{4.6-26}$$

显然，式中事件 $A_5(A_1+A_3)(A_2+A_4)$ 与 $\bar{A}_5(A_1A_2+A_3A_4)$ 是互斥的。将

$$\begin{aligned} P(A_s) &= R_s \\ P(A_1+A_3) &= P(A_1)+P(A_3)-P(A_1A_3) \\ &= R_1+R_3-R_1R_3 \\ P(A_2+A_4) &= P(A_2)+P(A_4)-P(A_2A_4) \\ &= R_2+R_4-R_2R_4 \end{aligned}$$

$$P(\bar{A}_5) = 1 - P(A_5) = 1 - R_5$$

$$P(A_1 A_2 + A_3 A_4) = P(A_1 A_2) + P(A_3 A_4) - P(A_1 A_2 A_3 A_4) \\ = R_1 R_2 + R_3 R_4 - R_1 R_2 R_3 R_4$$

代入式(4.6-26), 可得桥式系统的可靠度为

$$R_s = R_5(R_1 + R_3 - R_1 R_3)(R_2 + R_4 - R_2 R_4) + \\ (1 - R_5)(R_1 R_2 + R_3 R_4 - R_1 R_2 R_3 R_4) \quad (4.6-27)$$

将 $R_1=0.8, R_2=0.7, R_3=0.8, R_4=0.7, R_5=0.9$ 代入式(4.6-27)可算得 $R_s=0.86688$, 其结果与真值表法是一致的, 本法与真值表法相比, 其优点是不仅可求出系统可靠度值, 而且能得出系统可靠度的关系式。

2 可靠性分配

产品(系统)可靠性分配就是根据事先规定的产品(系统)可靠性指标, 制订出产品各组成单元(元件或分系统)的可靠性指标, 也就是将事先规定的产品(系统)可靠性指标分配给产品的各组成单元。一般对有可靠性指标要求的产品进行设计及改进产品的可靠性时, 都要进行可靠性分配。其目的是明确产品(系统)各组成单元的可靠性要求, 并在进行可靠性技术设计时可采取措施实现这个要求。

可靠性分配的目的就是使设计人员了解可靠性设计要求, 并以此估计所需的人力、时间、资源等, 同时研究实现可靠性指标的可能性和实现的方法。

可靠性分配主要适用于方案论证及工程研制阶段。

为了提高可靠性分配的合理性和可行性, 在进行可靠性分配时一般应遵循以下准则:

(1) 复杂程度高的系统或产品, 分配较低的可靠性指标。

(2) 技术上成熟继承性好的产品, 分配较高的可靠性指标。

(3) 处于较恶劣环境的产品, 分配较低的可靠性指标。

(4) 对于任务时间长的产品, 分配较低的可靠性指标。

(5) 重要度高的产品, 分配较高的可靠性指标。

(6) 可靠性分配是一个权衡过程, 为实现系统设计优化, 还应考虑其他约束条件。

下面介绍几种常用的可靠性分配方法。

2.1 简单的可靠性分配方法(等分配法)

等分配法是按产品各组成单元的可靠度均相等(均为 R) 的原则进行分配的分配方法。

这种分配方法计算简单、应用方便, 适用于方案论证和方案设计阶段。主要缺点是未考虑各分系统的实际差别。

(1) 串联系统可靠度分配。设事先规定产品(系统)的可靠度为 R_s , 分配到各组成单元的可靠度为 R , 则对于 n 个单元组成的串联系统, 有

$$R = \sqrt[n]{R_s} \quad (4.6-28)$$

(2) 并联系统可靠度分配。对于 n 个单元组成的并联系统, 有

$$R = 1 - \sqrt[n]{1 - R_s} \quad (4.6-29)$$

(3) 串、并联系统可靠度分配。对于串、并联系统, 先把系统中并联部分看作一个单元, 按串联系统分配方法进行分配, 然后再针对并联部分按照等分配法进行再分配, 得到每个并联单元的分配值。

2.2 根据相对失效率进行可靠性分配

这种可靠性分配方法是按各组成单元的相对失效率大小进行可靠性分配, 适用于与原有的系统十分相似的新系统,

且原有系统及其各组成单元的可靠性均已知或可推测。

对于一个由 n 个单元组成的串联系统, 如果根据已有的数据可推测出各单元的失效率为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 并推测出系统失效率

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (4.6-30)$$

则第 i 个单元的相对失效率为

$$\omega_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_s} = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (4.6-31)$$

若事先规定该产品(系统)的失效率指标为 λ_s , 则分配至第 i 个单元的失效率为

$$\lambda_i = \omega_i \lambda_s \quad (4.6-32)$$

设事先规定产品(系统)工作到给定时刻 t_g 时的可靠度为 $R_s(t_g)$, 则分配到各组成单元的可靠度为

$$R_i(t_g) = [R_s(t_g)]^{\omega_i} \quad (4.6-33)$$

式中 ω_i 可由式(4.6-31)求得。

2.3 根据各组成单元的重要度及复杂度进行可靠性分配(AGREE分配法)

AGREE分配法是由美国国防部电子设备可靠性顾问团于20世纪50年代提出的方法。这种分配方法适用于寿命为指数分布的各单元组成的串联系统, 既考虑了各单元的复杂性, 又考虑了各单元的重要性。

复杂性因子定义为

$$\frac{n_i}{N} = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^k n_i} = \frac{\text{第 } i \text{ 个单元的基本元件数}}{\text{系统的基本元件总数}} \quad (4.6-34)$$

重要性因子定义为

$$W_i = \frac{\text{由第 } i \text{ 个单元故障引起系统故障的次数}}{\text{第 } i \text{ 个单元故障总次数}} \quad (4.6-35)$$

失效率的分配公式为

$$\lambda_i = - \frac{n_i \ln R_s(t)}{N W_i t_i} \quad (4.6-36)$$

可靠度分配公式为

$$R_i(t_i) = 1 - \frac{1 - [R_s(t)]^{n_i/N}}{W_i} \quad (4.6-37)$$

平均寿命的分配公式为

$$MTTF_i = \frac{-t_i}{\ln \left\{ 1 - \frac{1 - [R_s(t)]^{n_i/N}}{W_i} \right\}} \quad (4.6-38)$$

式中: t_i 为第 i 个单元的任务时间; t 为系统的任务时间; n_i 为第 i 个单元的基本元件数; k 为系统单元总数; N 为系统的基本元件总数; $R(t)$ 为系统可靠性指标; $R_i(t_i)$ 为第 i 个单元在其任务时间内可靠度分配值; λ_i 为第 i 个单元失效率分配值; $MTTF_i$ 为第 i 个单元平均寿命分配值。

该方法中复杂性因子定义适合于当时电子产品主要由分立元件构成的情形。但是, 随着电子技术的飞速发展, 现代电子产品已趋向模块化、集成化, 从而该方法中复杂性因子定义已不再符合实际, 应当加以修正。一种修正方法是该因子视作复杂性的权系数, 记作 k , 原分配式(4.6-36)~式(4.6-38)中的复杂性因子 n_i/N 换成 k_i 。 k_i 数值可由专家评分确定。

2.4 花费最小可靠性分配法

这种方法适用于在优化设计的条件下使用。成本最小分配法是解决在可靠性设计中最关键也是最实际的问题，即如何既能保证产品可靠性总指标的分配，又能实现总的研制成本最小。

使用这种方法时，首先要建立单元可靠度与研制成本的关系

$$R_i = f(C_i) \tag{4.6-39}$$

其次建立系统可靠度与单元可靠度之间的关系

$$R = \prod_{i=1}^n R_i \tag{4.6-40}$$

则可靠性分配问题可归结为：在满足 R 的约束条件下，求使 $C = \sum_{i=1}^n C_i$ 为最小的单元可靠度 R_i 。

3 可靠性技术设计

3.1 降额使用

降额使用是指“为改善可靠性而有计划地减轻材料或元器件的内部应力”。对于电子元器件来说，一般是指元器件在实际使用时所消耗的功率（或所加的电压）要比元器件的额定功率（或额定电压）降低一定的幅度。因此，可以把降额系数 DF 定义为

$$DF = \frac{\text{元器件在实际使用状态下的消耗功率(或所加电压)}}{\text{元器件的额定功率(或额定电压)}} \tag{4.6-41}$$

根据阿伦尼斯方程可知，当温度 T 降低时，元器件的寿命会增高。所以当电子元器件的寿命与温度间的关系服从阿伦尼斯方程，实际使用状态下的消耗功率低于额定功率时，其温度也低于额定功率时的温度，因而其寿命将比额定功率下的寿命长，从而可减小其失效率，提高其可靠性。同样，当电子元器件的寿命与所加电压间的关系服从逆幂律方程，实际使用状态下所加电压低于额定电压时，其寿命也将会延长，从而也可以降低其失效率，提高其可靠性。

进行产品设计时，所用的电子元器件究竟应作多大程度的降额，要根据具体情况来确定。例如，所用的元器件数量较少，产品达到规定的可靠度没有多大困难时，就不必大幅度地降额，只要保证在使用时不超过其额定值就可以了；当所用的元器件数量较多，产品达到规定的可靠度有困难时，就应进行较大幅度的降额。

元器件降额后，整个产品的质量、体积和成本都随之增加，所以还应研究失效率与这些因素的关系（即降额折中曲线），进行折中考虑。图 4.6-9 举出了某型号电容器的降额

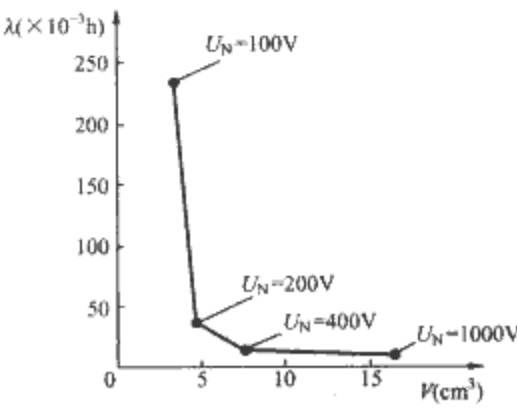


图 4.6-9 某型号电容器的降额折中曲线

折中曲线的一个例子，它表示了在不同降额系数时电容器的体积与失效率间的关系。图 4.6-9 中电容器的工作电压为 100V。选额定电压 $U_N = 200V$ 的电容器时，其降额系数 $DF = 0.5$ ；选 $U_N = 400V$ 的电容器时，其降额系数 $DF = 0.25$ 。由图 4.6-9 可以看出 $DF = 0.5$ 或 $DF = 0.25$ 两种情况都较好，它们能兼顾到失效率和电容器体积两个方面。若选 $U_N = 1000V$ 的电容器，虽可使失效率稍有降低，但其体积将大大增加；若选 $U_N = 100V$ 的电容器，虽可使体积稍有减小，但其失效率将大大增加。

3.2 贮备设计（冗余设计）

贮备设计方法是指把若干功能相同的单元作为备用，以提高整个系统或设备可靠度的设计方法。典型的贮备方式为并联方式，如果一个产品有 n 个单元组成，只要其中一个单元正常工作，产品就能正常工作，这种贮备方式就是并联方式。

应该指出，上面所说的并联方式和电路中的并联是不同的概念。例如，某型号电容器的主要失效模式是短路，为提高其可靠性，可在电路中采用两个相同的电容器串联连接来代替原有的一个电容器，如图 4.6-10 (a) 所示。在这种情况下，只要两个电容器中有一个未短路，就不会使电路短路；只有在两个电容器同时短路时，电路才短路。如果一个电容器短路的概率用 P_1 表示，则两个电容器同时短路的概率为 P_1^2 。显然， $P_1^2 < P_1$ ，所以采用两个电容器串联来代替原有的一个电容器可以使电路短路的概率减小，从而提高电路的可靠性，这就是一种采用并联方式（尽管两个电容器在电路中是串联的）的贮备设计方法。

若电容器的主要失效模式为开路，则应采用两个电容器并联的贮备设计方法，如图 4.6-10 (b) 所示。这时只有当两个电容器都开路时电路才会开路，因而可以使电路开路的概率减小，从而提高电路的可靠性。

若电容器同时具有短路及开路两种失效模式，则采用图 4.6-10(a)及图 4.6-10(b)所示的电路都不能提高电路的可靠性，此时可采用混合贮备电路，如图 4.6-10(c)所示。这时只有当电容器 C_1 与 C_2 或 C_3 与 C_4 都开路时电路才开路；当 C_1 和 C_2 中的一个与 C_3 和 C_4 中的一个同时短路时，电路才短路，从而减小了电路开路或短路的概率，提高了电路可靠性。

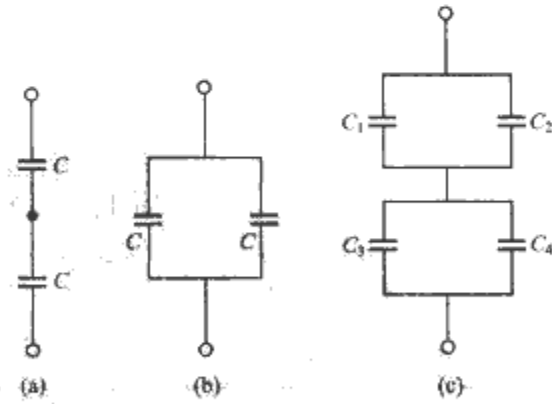


图 4.6-10 电容器的贮备设计电路
(a) 两电容器串联；(b) 两电容器并联；
(c) 四个电容器两两并联后再串联

3.3 耐环境设计

耐环境设计是指考虑各种环境条件的设计，它包括耐机械应力（冲击、振动等）设计、抗气候条件（高温、低温、潮湿、盐雾等）设计及抗辐射设计等。进行耐环境设计时，应考虑的问题是预计产品在实际使用时所处的环境条件，以

及在设计上应采取的耐环境措施。

3.4 耐热设计

控制产品各部分温升的设计称为耐热设计。可采取提高耐热性能、加强对流和辐射来改善产品散热条件等措施。耐热设计的核心问题是热力学计算，详细内容可参考相关文献。

3.5 耐振动设计

3.5.1 振动与冲击的影响

冲击是对物体施加突然的作用力时发生的，其加速度可能很大。冲击可能引起下述后果：

- (1) 使较脆的材料损坏。
- (2) 使较软的材料变形。
- (3) 使产品发生误动作。

振动是周期地施加大小交替的力，它可能引起产品发生疲劳性失效。当振动频率与产品部件的固有振动频率相同时会产生共振，这时产品可能完全被破坏。

3.5.2 防振措施

常见的防振措施如下：

- (1) 元件的配置（或安装）适当。

- 1) 将较重的元件安装在产品总体的下部。
- 2) 电气接线应牢固地固定在底板或框架上，在引出端附近不能松动摇晃。
- 3) 螺栓固定时应采用弹簧垫圈。
- 4) 尽量不用外伸托架。

(2) 采用缓冲。为了减轻从基座（或框架、底板等）传递到产品的振动和冲击，可在基座与产品之间安装适当的减振器。对于防冲击来说，可使用在压缩时富有弹性的缓冲材料（如橡胶等），也可使用空气缓冲器。对于防振动来说，可使用蜂窝状纸质减振器、泡沫聚苯乙烯塑料块、橡胶垫、金属弹簧等，以削弱振动能量的传递，并可将产品的固有振动频率减到低于外加振动源的振动频率下限，以防止产生共振。

3.6 参数设计

参数设计是根据系统设计寻找使得产品的性能达到优良状态时的参数搭配，即寻找所谓的好参数组合。参数设计的方法很多，有用正交表作参数设计的方法，直接择优法、稳定性择优法、直接择优与稳定性择优相结合的方法及正交与回归相结合的方法等。

3.6.1 正交表

正交表是由数学工作者根据数学理论构造出的一些规格化的表，这些表是正交法的基本工具。以表 4.6-3 $L_8(2^7)$ 为例，介绍一下正交表的构造和特点。

表 4.6-3 $L_8(2^7)$

列号	1	2	3	4	5	6	7
条件号	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	2	2	1	2
2	2	1	2	2	1	1	1
3	1	2	2	2	2	2	1
4	2	2	1	2	1	2	2
5	1	1	2	1	1	2	2
6	2	1	1	1	2	2	1
7	1	2	1	1	1	1	1
8	2	2	2	1	2	1	2

正交表的特点如下：

(1) 在每个纵列中，就各自的字码来说，每个字码出现的次数都是相同的。

(2) 在任意两个纵列横向形成的数字对中，每个数字对出现的次数都相同，即任意两个纵列字码之间的搭配是均衡的。

凡是正交表都具有上述两个特点，这两个特点就叫做正交表的正交性。正交表的记号为 $L_8(2^7)$ ， L 的下角 8 是正交表的横行数（试验次数）；括号中的数 2 是表中的字码数（位级数）；2 的上角 7 是表的纵列数（因素数）。

3.6.2 直接择优法

直接择优就是选择参数组合使得产品的性能指标达到优良。可利用正交表来安排和分析多因素试验，确定生产工艺、制订生产计划、合理选择参数等。

(1) 首先需要确定因素及位级。因素即要确定的参数，位级即参数的几个取值，例如四因素三位级的因素位级表如表 4.6-4 所示。

表 4.6-4 因素位级表

因素	A	B	C	D
位级				
1	A_1	B_1	C_1	D_1
2	A_2	B_2	C_2	D_2
3	A_3	B_3	C_3	D_3

为了提高总的试验效果，每个因素三个位级的次序可以既不是从小到大排列，也不是从大到小排列，而是任意排列。

(2) 其次需要制订试验方案。可选择一种合适的正交表，将因素顺序列上，位级对号入座。例如四因素三位级时可选用正交表 $L_9(3^4)$ 来安排试验，得到的试验方案表如表 4.6-5 所示。

(3) 列出试验条件。试验方案表中每一横行就是一种试验条件，试验次序可由操作方便而定。试验结果（目标值）填入表 4.6-5 的右端目标值一栏中。

表 4.6-5 试验方案表

因素列号	A	B	C	D	目标值
条件号	1	2	3	4	
1	1(A_1)	1(B_1)	3(C_3)	2(D_2)	F_1
2	2(A_2)	1	1(C_1)	1(D_1)	F_2
3	3(A_3)	1	2(C_2)	3(D_3)	F_3
4	1	2(B_2)	2	1	F_4
5	2	2	3	3	F_5
6	3	2	1	2	F_6
7	1	3(B_3)	1	3	F_7
8	2	3	2	2	F_8
9	3	3	3	1	F_9
I	I _A	I _B	I _C	I _D	I + II + III = 总和
II	II _A	II _B	II _C	II _D	
III	III _A	III _B	III _C	III _D	
R	R_A	R_B	R_C	R_D	

(4) 分析试验结果。

1) 直接看。直接比较这 9 个试验结果，找出效果较好的一组，即可得到各因素搭配较好的位级。这是通过试验得到的好搭配，当然是比较可靠的。

2) 算一算。通过对试验的数量结果作简单的计算，往

往还能找出效果更好的试验条件，同时还能粗略地估计出哪些因素比较重要，各因素的好位级大致在什么地方。

首先对每个因素计算各位级的三次目标值之和 I、II、III。例如，第 1 列的因素 A 的 $I_A = F_1 + F_4 + F_7$ ，这是由这一列 3 个位级 1 所在的三个试验的目标值加在一起得到的； $II_A = F_2 + F_5 + F_8$ ，这是由这一列 3 个位级 2 所在的三个试验的目标值加在一起得到的； $III_A = F_3 + F_6 + F_9$ ，这是由这一列 3 个位级 3 所在的三个试验的目标值加在一起得到的。其他 3 列的 I，II，III 的算法与第 1 列的算法相同。显然，每列 I，II，III 之和都等于这 9 个试验结果的总和，这可以用来检验各列的运算是否正确。

极差 R 是由各列的 I，II，III 中的最大数减去最小数得到的。将每个因素的极差都算出来，填在表 4.6-5 的最下方。

比较每列 I，II，III 的大小，与其中最大值相对应的位级对结果影响最大。

极差 R 的大小可以用来衡量试验中相应因素作用的大小。极差大的因素意味着它选取的不同位级对于结果的影响较大，一般说来，它是重要因素。可选用它的最好的位级，或围绕着它的最好位级再进行考察。而极差小的因素可能是不重要的因素，它选取的不同位级对于结果的影响不大，因而可以按照节约、方便、高效、降低成本等原则来选择它们的位级。

3) 画趋势图。对于数量性的因素，画出用量与试验结果之间的关系图，也就是把算一算的结果形象化，以便从图形上明显地看出试验结果随各因素值变化的大致关系。

3.6.3 稳定性择优

稳定性择优就是对性能指标随着环境的变化，或随着元、器件等的变化而产生一些波动的产品，选择好的参数组合，使得产品性能波动小、稳定性好。

设计一件产品往往要求它的某个性能指标达到指定的目标值。对于可计算性项目，即使通过计算找到了好的参数搭配，使得性能指标达到了目标值，但是由于零部件有误差，因而组装完工后，产品的性能指标常常会偏离目标值。因此这类产品系统设计以后，要作稳定性参数设计，选择好零部件的参数组合，使得组装后产品的指标尽可能地稳定在目标值附近。这属于稳定性择优的问题。

一般情况下，设产品的特性值 y 是参数 A, B, \dots, M 的函数，即 $y = f(A, B, \dots, M)$ 。它的目标值为 m 。希望找到一组参数 (A_0, B_0, \dots, M_0) ，使 $f(A_0, B_0, \dots, M_0) = m$ 。由于参数的波动 $(\pm \Delta A, \pm \Delta B, \dots, \pm \Delta M)$ ，使得 $f(A_0 \pm \Delta A, B_0 \pm \Delta B, \dots, M_0 \pm \Delta M)$ 偏离 m 。所以条件 (A_0, B_0, \dots, M_0) 的好坏，不仅要看 $f(A_0, B_0, \dots, M_0)$ 对 m 偏离的大小，而且还要看 $f(A_0 \pm \Delta A, B_0 \pm \Delta B, \dots, M_0 \pm \Delta M)$ 与目标值 m 的接近程度。取 n 个样品，设它们的特性值分别为 y_1, y_2, \dots, y_n 。若 y_1, y_2, \dots, y_n 都与 m 值很接近，则这组参数搭配是好的。若 y_1, y_2, \dots, y_n 中有一部分偏离 m ，则这组参数搭配不好。为此可取偏差均方

$$v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - m)^2 \tag{4.6-42}$$

来判别稳定性的优劣， v 值越小越好。

稳定性择优的步骤如下：

(1) 选定因素、位级，作出因素位级表；选用合适的正交表，作出试验方案表（选优表）。例如对于四因素三位级问题，选优表及其考核指标如表 4.6-5 所示。

(2) 对每一号条件均制订一张误差因素位级表。对于四

因素问题，若某一条件处各参数值为 A_0, B_0, C_0, D_0 ，参数的波动为 $\pm \Delta A, \pm \Delta B, \pm \Delta C, \pm \Delta D$ ，则误差因素位级表如表 4.6-6 所示。

表 4.6-6 误差因素位级表

因素 位级	A	B	C	D
	1	2	3	4
1	$A_0 - \Delta A$	$B_0 - \Delta B$	$C_0 - \Delta C$	$D_0 - \Delta D$
2	A_0	B_0	C_0	D_0
3	$A_0 + \Delta A$	$B_0 + \Delta B$	$C_0 + \Delta C$	$D_0 + \Delta D$

(3) 根据误差因素位级表，选择合适的正交表，制订误差正交表。对于如表 4.6-6 所示的误差因素位级表，制订的误差正交表如表 4.6-7 所示。

计算出各样品的 y 值，填入表的右端。

表 4.6-7 误差正交表

因素列号 条件号	A	B	C	D	y
	1	2	3	4	
1	$1(A_0 - \Delta A)$	$1(B_0 - \Delta B)$	$3(C_0 + \Delta C)$	$2(D_0)$	y_1
2	$2(A_0)$	1	$1(C_0 - \Delta C)$	$1(D_0 - \Delta D)$	y_2
3	$3(A_0 + \Delta A)$	1	$2(C_0)$	$3(D_0 + \Delta D)$	y_3
4	1	$2(B_0)$	2	1	y_4
5	2	2	3	3	y_5
6	3	2	1	2	y_6
7	1	$3(B_0 + \Delta B)$	1	3	y_7
8	2	3	2	2	y_8
9	3	3	3	1	y_9

(4) 计算偏差均方，填入选优表中。选优表每一条件的优劣应该用每一个条件的误差正交表计算的 y_i 值与预期值 m 的接近程度来衡量。若这组中所有的 y_i 值都与预期值 m 接近，则这组条件是好的；若有一部分 y_i 值与预期值 m 偏离较远，则这组条件是不好的。按式 (4.6-42) 计算偏差均方 v_i ，填入选优表中（表 4.6-5 中目标值一列）。

(5) 重复步骤 (2)~(4)，计算选优表中每一条件处的 v_i 并填入选优表中。

(6) 按直接择优法中介绍的分析试验结果的方法，可得到直接看和算一算的好结果。

(7) 将得到的好结果作为下一轮的中心条件，重复 (1)~(6) 步，作多轮计算，即可得到稳定性较好的结果。

3.6.4 直接择优与稳定性择优相结合

设计方法：首先建立优化指标 p ，然后进行直接择优，再对满足设计要求的条件作稳定性检查。由稳定性检查提供的信息来修改优化指标 p ；再按新的优化指标 p 进行直接择优，对满足新指标的条件又作稳定性检查。再修改 p ，以此类推。这样，直接择优与稳定性择优就由指标 p 的变化把它们结合起来，从而保证了优化方向正确，即使参数搭配的中心值朝着更好的方向移动，又使参数所允许的误差范围向更大的方向移动。

3.7 容差设计

容差设计是在参数设计的基础上通过质量损失函数解决提高质量与降低成本这一对矛盾的方法。换句话说容差设计是选择参数的精度，以便使产品的总经济损失达到最低的限度。

成本损失是指生产者生产产品时用的原料、工具、人

工、管理、能源等费用，即企业家的损失。质量损失是指产品性能波动给使用者造成的损失，即产品出售后给社会带来的损失。把质量损失和成本损失放在一起来考虑也就是把企业家的利益和消费者的损失溶为一体。

选出参数值好的搭配后，参数的精度既影响产品的成本损失，又影响产品的质量损失。参数的精度高，会使产品的质量高，从而减少了质量损失。但是精度高的元器件价钱贵，又增加了产品的成本损失；元器件的精度低，价钱便宜，虽然减少了成本损失，但使产品的质量下降，又增加了质量损失。显然，使得

总损失=质量损失+成本损失
最小是选择最佳精度的标准。

- 容差设计的步骤如下：
- (1) 进行参数设计，得到参数设计的好条件。
 - (2) 在参数设计的好条件处列出误差正交表。
 - (3) 将每个因素相应的各位级指标之和 I，II，III 及级差 R 都算出来填在误差正交表中。
 - (4) 从表中的 I，II，III，R 可看出哪个因素的波动对指标的影响较大，即对偏差的平方影响较大。
 - (5) 对影响较大的因素，选用更高的精度，再作一张误差正交表，由此表可知产品性能指标的稳定性更好一些。
 - (6) 改变一次精度，作一张误差正交表，并计算平均质量损失、成本损失及总损失。
 - (7) 根据总损失最小来选取各因素的精度。

4 电器触头的可靠性设计

触头是影响电器寿命和可靠性的关键部件。据统计，小型继电器的故障中 70% 以上是由于触头故障所造成的，所以触头的可靠性在电器中是十分重要的，而触头的可靠性除了与使用环境、触头电路参数等因素密切相关外，在很大程度上取决于可靠性设计，所以开展电器触头的可靠性设计具有十分重要的意义。

4.1 电器触头材料及结构形式的选择

4.1.1 触头结构形式的选择

触头的接触电阻由收缩电阻和膜电阻两部分组成。收缩电阻是由于接触点附近电流线发生收缩而形成的，膜电阻则由于触头接触表面产生尘埃膜、吸附膜、有机膜、无机膜等各种膜所造成的。对于大、中负荷触头，其表面膜易被压碎或被触头断开电流时所产生的火花、电弧烧掉，所以其接触电阻主要取决于收缩电阻，因此，应选择接触点数量较多的面接触或线接触。对于小负荷触头，其表面膜不易破坏，所以其接触电阻主要取决于膜电阻，为了增大接触点的压强来提高清除表面膜的能力，宜选择接触点数量较少的点接触。

4.1.2 触头材料的选择

触头材料的电阻率、硬度及其化学性能直接影响到触头接触电阻的大小。应采用硬度高、熔点高、导电导热性能好和极限电弧参数高的材料制造大负荷触头，而小负荷触头应采用接触电阻小和化学稳定性好的触头材料。另外，还应考虑选用合适的有机材料并采取适当的工艺，使其在使用中尽可能少地产生对触头有害的气体，并且选用不易产生氧化膜、有机膜或吸附膜的触头材料。

电器触头中采用不同材料配对使用，可限制液桥所造成的金属转移，这对弱电继电器的触点来说尤为重要（在弱电继电器中，液桥造成的金属定向转移是造成触头电磨损的主

要原因）。为了限制液桥的金属转移，可采用导电及导热性能较好的材料作阳极，导电及导热性能较差的材料作阴极，如表 4.6-8 所示。

表 4.6-8 触头材料配对表							
阳极材料	Ag	Ag	Ag	Ag	Au	Au	Au
阴极材料	Au	Pt	Pd	Pt-Ir	Pt	Pd	Pt-Ir

采用不同材料配对，还可提高触头的耐电磨损性。例如，Ag-CdO 与 Ag 配对时，其电磨损率要低于两个触头均为 Ag-CdO 时的电磨损率，更低于纯 Ag 触头对时的电磨损率。又如 Ag-Ni(含 Ni20%)与 Ag 配对时的电磨损率也低于两个触头材料均为 Ag-Ni 或均为纯 Ag 时的电磨损率。

4.2 减小与稳定接触电阻的设计方法

- (1) 适当增大触头压力。触头压力增大时，收缩电阻及膜电阻都会减小，所以适当增大触头压力是减小与稳定触头接触电阻的有效方法。但触头压力不宜过分增大，应综合考虑特性配合及电磁系统尺寸等因素。
- (2) 正确选择触头表面的加工精度。对于毫安级的小负荷触头，为了减少污染，可采用抛光等方法，使触头表面有较低的表面粗糙度。
- (3) 在电压低、电流小的电路中使用的触头，尽可能设计成具有一定相对滑动及滚动的结构。
- (4) 为了消除插头与插座间的高接触电阻，尽量不采用插入式连接。
- (5) 防止触头污染。在电器的装配、运输、储存、安装中，应尽量注意防止触头污染；电器应具有防尘罩壳；电器触头尽可能与有机绝缘材料隔开；在含有化学腐蚀性气体的环境中工作的触头应采用密封结构；在密封继电器中放置可吸附绝缘材料中挥发出的有机气体的吸气材料或吸气剂。
- (6) 为了避免在电器触头间落入尘埃而产生接触故障，可采用图 4.6-11 所示的双子触头。试验结果表明，在相同的总触头压力下，采用双子触头后，其故障概率可大大降低。

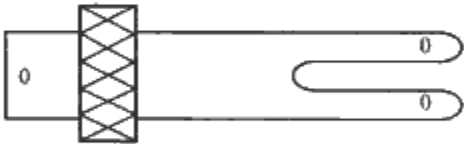


图 4.6-11 双子触头

4.3 减小触头回跳的设计方法

触头回跳可使触头电磨损增加，甚至会导致触头粘接，从而会影响电器的可靠性。常用的减小触头回跳的方法如下：

- (1) 适当增大触头初压力。
- (2) 适当减小触头闭合速度。
- (3) 适当减小可动触头的质量。
- (4) 产品设计时尽可能做到使触头运动方向与衔铁运动方向相互垂直。
- (5) 为了避免电器受到外界冲击与振动时由于衔铁晃动而使触头产生回跳，可采用完全平衡的衔铁结构，或减小衔铁的质量，提高作用于衔铁上的力与衔铁质量的比值。
- (6) 采用转动式结构，改变杠杆比。
- (7) 采用迎击式铁心结构，降低铁心碰撞时的速度并有

缓冲,以减小铁心的碰撞引起的触头回跳。

4.4 触头的冗余设计

在要求触头工作可靠性较高的场合,如电器的触头数量有多余时可采用冗余设计的方法来提高触头的工作可靠性。

当触头的主要故障模式为接触电阻过大(接触不良)时可采用图4.6-12所示的冗余设计电路,即把两个触头并联来当作一个触头使用。这时仅

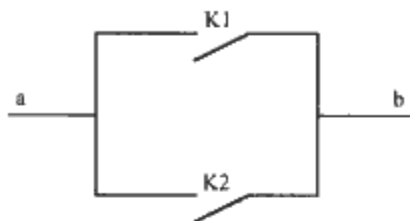


图 4.6-12 触头并联电路

当两个触头K1与K2均接触不良时,ab间的电阻才过大。若一个触头接触不良的概率为 P_k ,则两个触头均接触不良的概率为 P_k^2 ,显然 $P_k^2 < P_k$,所以当触头的主要故障模式为接触不良时,采用图4.6-12所示的冗余设计电路可提高触头的工作可靠性。

当触头的主要故障模式为短路(即粘接)时,可采用图4.6-13所示的冗余设计电路,即把两个触头串联来当作一个触头使用。这种情况下,仅当两个触头均发生短路故障时,ab间才会发生短路。若一个触头发生短路故障的概率为 P_d ,则两个触头均发生短路故障的概率为 P_d^2 。显然 $P_d^2 < P_d$,所以当触头主要故障模式为短路时,采用图4.6-13所示的冗余设计电路可提高触头的工作可靠性。

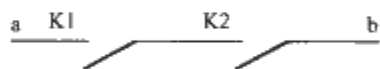


图 4.6-13 触头串联电路

当触头同时存在接触不良故障和粘接故障(两者概率相等或接近)时,采用图4.6-12和图4.6-13所示电路均不能提高触头的工作可靠性,这时可采用图4.6-14所示的冗余设计电路,即采用4个触头两两并联后再串联来当作一个触头使用。这时仅当K1与K2或K3与K4同时存在接触不良故障时,ab间的电阻才过大;或当K1、K2中至少有一个而K3、K4中也至少有一个同时发生粘接故障时,ab间才会短路,因此可使ab间发生接触不良或短路故障的概率减小,从而可提高触头的工作可靠性。

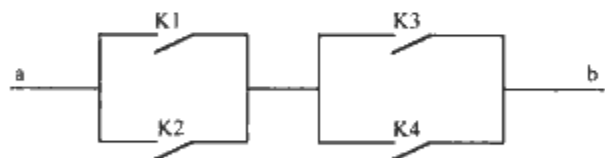


图 4.6-14 4个触头两两并联后再串联

下面讨论采用图4.6-14所示冗余设计电路时的故障概率及可靠度。设触头的失效分布类型为指数分布,其故障率为 λ ,且触头发生接触不良的概率与发生短路(粘接)的概率之比保持常数,则一个触头的可靠度 $R(t)$ 及故障概率 $F(t)$ 分别为

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (4.6-43)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (4.6-44)$$

设触头发生接触不良的概率在触头总故障概率中所占的比率为 k ,则一个触头发生接触不良的概率 $F_k(t)$ 及短路的概率 $F_d(t)$ 分别为

$$F_k(t) = k(1 - e^{-\lambda t}) \quad (4.6-45)$$

$$F_d(t) = (1 - k)(1 - e^{-\lambda t}) \quad (4.6-46)$$

对于触头的不同故障模式,图4.6-14所示的冗余设计电路的可靠性框图也不同。当触头的故障模式为接触不良

时,其可靠性框图如图4.6-15所示,所以ab间发生接触不良的故障概率为

$$F_{sk}(t) = 1 - [1 - F_k^2(t)]^2 \quad (4.6-47)$$

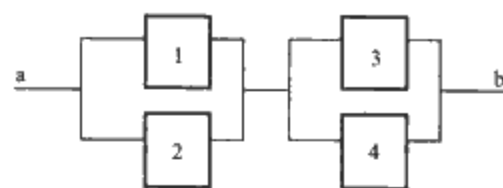


图 4.6-15 触头的故障模式为接触不良时的可靠性框图

当触头的故障模式为短路时,其可靠性框图如图4.6-16所示,所以ab间发生短路的故障概率为

$$F_{sd}(t) = \{1 - [1 - F_d(t)]^2\}^2 \quad (4.6-48)$$

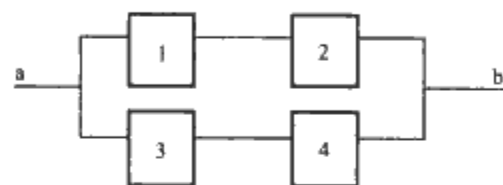


图 4.6-16 触头的故障模式为短路时的可靠性框图

图4.6-14所示冗余设计电路的总故障概率、可靠度分别为

$$F_s(t) = F_{sk}(t) + F_{sd}(t) \\ = 1 - [1 - F_k^2(t)]^2 + \{1 - [1 - F_d(t)]^2\}^2 \quad (4.6-49)$$

$$R_s(t) = 1 - F_s(t) \\ = [1 - F_k^2(t)]^2 - \{1 - [1 - F_d(t)]^2\}^2 \quad (4.6-50)$$

将式(4.6-45)、式(4.6-46)代入式(4.6-50)可得

$$R_s(t) = [1 - k^2(1 - e^{-\lambda t})^2]^2 - \\ \{1 - [1 - (1 - k)(1 - e^{-\lambda t})]^2\}^2 \quad (4.6-51)$$

在已知 k 值及触头故障率 λ 的情况下,由式(4.6-51)可计算出任一工作时刻如图4.6-14所示冗余设计电路的可靠度。

5 电器中机械构件的可靠性设计

5.1 基于应力—强度干涉模型的可靠性设计的基本原理

应力—强度干涉模型(stress—strength interference model)简称为干涉模型,可以清楚地揭示零件可靠性设计的本质,因此是零件可靠性设计的基本模型。

5.1.1 应力—强度干涉模型基本原理

5.1.1.1 应力—强度干涉模型

一般而言,施加于产品或零件上的物理量,如应力、压力、温度、湿度、冲击、电压等,统称为产品或零件所受的应力,用 Y 表示;产品或零件能够承受这种应力的程度统称为产品或零件的强度,用 X 表示。如果产品或零件的强度 X 小于应力 Y ,则它们就不能完成规定的功能,称为失效。欲使产品或零件在规定的时间内可靠地工作,必须满足

$$Z = X - Y \geq 0 \quad (4.6-52)$$

在产品设计中,强度 X 及应力 Y 本身是某些变量的函数,即

$$X = f_X(X_1, X_2, \dots, X_m) \\ Y = g_Y(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \quad (4.6-53)$$

式中: X_i ($i=1, 2, \dots, m$)为影响强度的随机量,如零件材料性能、表面质量、尺寸效应、材料对缺口的敏感性等; Y_j ($j=1, 2, \dots, n$)为影响应力的随机量,如载荷情况、应力集中、工作温度、润滑状态等。

所以应力、强度均为具有一定分布的随机变量。由于应力、强度具有相同的量纲,故可以表示在同一坐标系中。应力—强度干涉模型如图 4.6-17 所示。

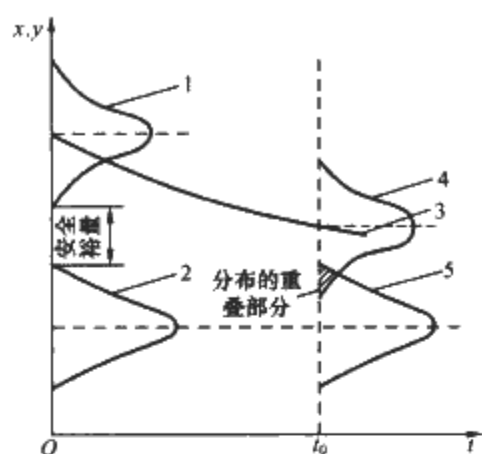


图 4.6-17 应力—强度干涉模型

1— $t=0$ 时的强度分布；2— $t=0$ 时的应力分布；
3—强度均值的退化曲线；4— $t=t_0$ 时的强度分布；
5— $t=t_0$ 时的应力分布

由统计分布函数的性质可知,应力、强度两条概率密度函数曲线在一定的条件下可能发生相交,也称为发生干涉,将这种发生相交的现象称为干涉现象。其相互重叠的区域(图 4.6-17 中的阴影部分)中可能会出现 $X \leq Y$, 因而此区域是零件可能出现失效的区域,在本模型中称为干涉区。对于机械零件,即使设计时无干涉现象,零件在长期使用过程中,尤其在动载荷的长时间作用下,强度也会衰减,如由图 4.6-17 中的 $t=0$ 位置沿着衰减退化曲线移到 $t=t_0$ 位置,使应力、强度两条概率密度函数曲线发生干涉,甚至引起应力超过强度,出现故障或失效。

对于某一时刻 t , 其应力—强度干涉情况如图 4.6-18 所示。图 4.6-18 中,横坐标表示应力或强度,纵坐标表示应力、强度的概率密度,曲线 $f(x)$ 和 $g(y)$ 分别表示强度、应力概率密度的变化。图 4.6-18 中阴影部分即为应力—强度分布的“干涉区”,表示在此区域内可能发生强度小于应力。这种根据应力、强度干涉情况计算产品可靠性的模型,称为应力—强度干涉模型。

由干涉图可见:

(1) 若工作应力和零件强度的离散程度大,干涉部分必加大,不可靠度也增大。

(2) 当材料性能好,应力稳定时,会使两密度函数离散度减小,干涉区也减小,可靠性增大。可见,为保证产品可靠性,只进行传统的安全系数计算是不够的,还需要进行可靠度计算。

需要说明的是,在图 4.6-18 中,干涉区只表示在此区域中应力、强度发生了干涉。在干涉区内,零件失效还是不失效,应作具体分析:若应力大于强度,则零件失效;否则,应力小于强度,则零件不失效。

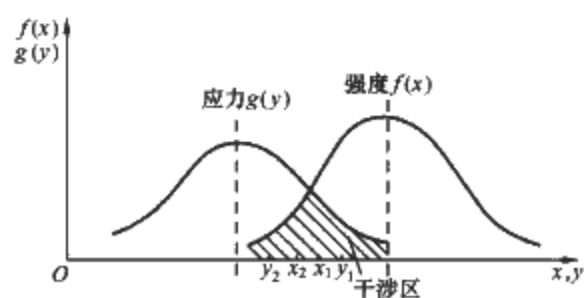


图 4.6-18 应力—强度干涉图

一般可以认为,若 Y 和 X 是相互独立的随机变量,则

其差值 $Z=X-Y$ 也是随机变量,产品或零件的可靠度 R 即是 Z 取值大于或等于零时的概率,即

$$R = P(Z \geq 0) \quad (4.6-54)$$

而累积失效概率为

$$P_F = 1 - R = P(Z < 0) \quad (4.6-55)$$

从干涉模型可见,任一设计都存在着失效概率,即可靠度 $R < 1$, 故设计时能够做到的仅仅是将失效概率控制在一个可以接受的限度之内。

基于上述模型的可靠度的计算方法,通常有解析法、数值积分法、图解法、蒙特卡洛模拟法等。

5.1.1.2 失效概率和可靠度计算的一般表达式

设强度 X 与应力 Y 的概率密度函数分别为 $f(x)$ 和 $g(y)$, 累积分布函数分别为 $F(x)$ 和 $G(y)$, 则确定失效概率 P_F 及可靠度 R 的方法有两种。

(1) 由概率乘法定理计算失效概率或可靠度。现将图 4.6-18 中的干涉区放大,如图 4.6-19 所示,在干涉区取小区间 dy , 则应力 y 在 dy 内的概率为

$$P\left(y_1 - \frac{dy}{2} \leq y \leq y_1 + \frac{dy}{2}\right) = g(y_1)dy \quad (4.6-56)$$

强度 x 小于应力 y_1 的概率为

$$P(x < y_1) = \int_{-\infty}^{y_1} f(x)dx \quad (4.6-57)$$

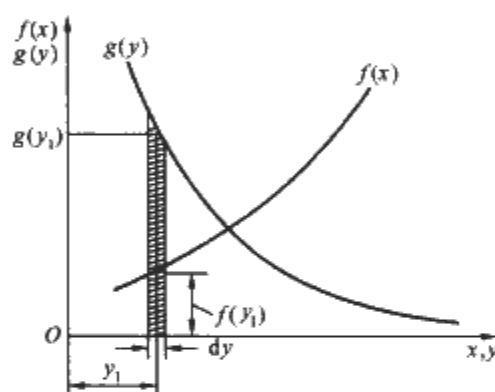


图 4.6-19 干涉区的放大图形

因这两者是相互独立的随机事件,故由概率乘法定理可知,它们同时发生的概率等于各自单独发生的概率的乘积,即

$$g(y_1)dy \int_{-\infty}^{y_1} f(x)dx$$

这个概率是应力在 dy 小区间内所引起的干涉概率亦即失效概率。那么,对整个应力分布,零件的失效概率为

$$P_F = P(x < y) = \int_{-\infty}^{\infty} g(y) \left[\int_{-\infty}^y f(x)dx \right] dy \quad (4.6-58)$$

因 $R=1-P_F$, 且 $\int_{-\infty}^y f(x)dx + \int_y^{\infty} f(x)dx = 1$, 故对应的可靠度为

$$R = P(x \geq y) = \int_{-\infty}^{\infty} g(y) \left[\int_y^{\infty} f(x)dx \right] dy \quad (4.6-59)$$

反之, P_F 也可以根据 $y > x$ 的概率来计算。仿照上述步骤,可得

$$P_F = P(y > x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \left[\int_x^{\infty} g(y)dy \right] dx \quad (4.6-60)$$

$$R = P(y \leq x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \left[\int_{-\infty}^x g(y)dy \right] dx \quad (4.6-61)$$

另外,式 (4.6-58) 及式 (4.6-60) 也可以写成如下形式

$$P_F = \int_{-\infty}^{\infty} F_x(y)g(y)dy \tag{4.6-62}$$

及
$$P_F = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)[1-G_y(x)]dx$$

$$= 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f(x)G_y(x)dx \tag{4.6-63}$$

式中： $F_x(y)$ 为 x 在点 y 处的累积分布函数值； $G_y(x)$ 为 y 在点 x 处的累积分布函数值。

若强度为某一固定值，设 $x=a$ ，则

$$P_F = P(y > a) = \int_a^{\infty} g(y)dy = 1 - G_y(a) \tag{4.6-64}$$

$$R = G_y(a) \tag{4.6-65}$$

(2) 由两个随机变量差 Z 的联合概率密度函数 $h(z)$ 计算失效概率或可靠度。因强度 X 和应力 Y 均为随机变量，

则 $Z = X - Y$ 也为随机变量，称为干涉随机变量。因 X 和 Y 彼此独立，根据概率论中的两个随机变量差的联合概率密度函数的卷积定理，可得 Z 的概率密度函数为

$$h(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f(z+y)g(y)dy \tag{4.6-66}$$

$z \geq 0$ 的概率是可靠度 R ，即

$$R = \int_0^{\infty} h(z)dz = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(z+y)g(y)dzdy \tag{4.6-67}$$

当应力、强度服从不同的分布时，其可靠度的具体计算公式也不同，下面介绍几种常用分布时的可靠度计算方法。

5.1.2 应力与强度为同一分布类型时的可靠度

应力与强度为同一分布类型时的可靠度计算公式如表 4.6-9 所示。

表 4.6-9 应力与强度为同一分布类型时的可靠度计算公式

分布类型	应力分布	强度分布	可靠度
正态分布	$N(\mu_y, \sigma_y^2)$	$N(\mu_x, \sigma_x^2)$	$R = \Phi(u_R); u_R = \frac{\mu_x - \mu_y}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}$
对数正态分布	$\ln Y \sim N(\mu_y, \sigma_y^2)$	$\ln X \sim N(\mu_x, \sigma_x^2)$	$R = \Phi(u_R); u_R = \frac{\mu_x - \mu_y}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}} \approx \frac{\ln \mu_x - \ln \mu_y}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}}$
威布尔分布	(m_y, η_y, γ_y)	(m_x, η_x, γ_x)	$R = 1 - \int_0^{\infty} e^{-z} \exp\left(-\left[\frac{\eta_x}{\eta_y} z^{1/m_x} + \left(\frac{\gamma_x - \gamma_y}{\eta_y}\right)^{m_y}\right] dz \right)$
指数分布	λ_y	λ_x	$R = \frac{\lambda_y}{\lambda_y + \lambda_x}$ 或 $R = \frac{\mu_x}{\mu_x + \mu_y}$

表 4.6-9 中除指数分布外计算可靠度的公式均较复杂，尽管正态分布时可查标准正态分布表，但对于计算机辅助设计时编程计算也较困难，需要采用数值计算方法近似求解。下面给出正态分布与威布尔分布时可靠度近似的计算公式。

5.1.2.1 正态分布时可靠度近似计算公式

$$R = \Phi(u_R) = \begin{cases} 1 - S(u_R) & (u_R \geq 0) \\ S(|u_R|) & (u_R < 0) \end{cases} \tag{4.6-68}$$

当 $0 \leq u_R \leq 3$ 时，有

$$S(u_R) = \frac{1}{2} - \frac{u_R \varphi(u_R)}{1 + \frac{2u_R^2}{3} + \frac{3u_R^4}{5} + \frac{4u_R^6}{7} + \frac{5u_R^8}{9} + \frac{6u_R^{10}}{11} + \dots} \tag{4.6-69}$$

当 $u_R > 3$ 时，有

$$S(u_R) = \frac{\varphi(u_R)}{u_R + \frac{1}{2} + \frac{1}{u_R} + \frac{3}{4u_R^3} + \frac{5}{8u_R^5} + \frac{7}{16u_R^7} + \dots} \tag{4.6-70}$$

其中 $\varphi(u_R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u_R^2}{2}}$ ($-\infty < u_R < \infty$)，近似公式取

28 项展开时，可靠度误差不超过 10^{-14} 。

5.1.2.2 威布尔分布时可靠度近似计算公式

$$R \approx 0.181341892(\xi_1 + \xi_2) + 0.156853323(\xi_3 + \xi_4) + 0.111190518(\xi_5 + \xi_6) + 0.050614268(\xi_7 + \xi_8) \tag{4.6-71}$$

式中 $\xi_i = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\eta_x}{\eta_y} B_i^{1/m_x} + \frac{\gamma_x - \gamma_y}{\eta_y}\right)^{m_y}\right]$

其中 i 为 1~8， B_i 见表 4.6-10。

表 4.6-10 B_i 的取值

i	B_i	i	B_i
1	0.895795505	5	2.286054858
2	0.524726255	6	0.107214189
3	1.488709147	7	3.919295813
4	0.270803710	8	0.020054832

5.1.3 应力与强度的分布类型不同时的可靠度

应力与强度为不同分布类型时的可靠度计算公式如表 4.6-11 所示。

表 4.6-11 应力与强度为不同分布类型时的可靠度计算公式

应力分布	强度分布	可靠度
威布尔分布 (m_y, η_y, γ_y)	正态分布 $N(\mu_x, \sigma_x^2)$	$R = 1 - \frac{C}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \exp \left[-z^m - \frac{(Cz + A)^2}{2} \right] dz$ 式中 $A = \frac{\gamma_y - \mu_x}{\sigma_x}, C = \frac{\eta_y}{\sigma_x}$
指数分布 λ_y	正态分布 $N(\mu_x, \sigma_x^2)$	$R = 1 - \Phi \left(-\frac{\mu_x}{\sigma_x} \right) - \left[1 - \Phi \left(-\frac{\mu_x - \lambda_y \sigma_x^2}{\sigma_x} \right) \right] \exp \left(-\mu_x \lambda_y + \frac{1}{2} \lambda_y^2 \sigma_x^2 \right)$

5.1.4 用数值积分法计算可靠度

当应力、强度分布函数较复杂时，很难用上面介绍的解析法求得可靠度的计算表达式，这时可用数值积分法。其基本原理如下：

设强度、应力的分布函数分别为 $F(x)$ 和 $G(x)$ ，其累积分布函数曲线如图 4.6-20 所示，分布密度函数分别为 $f(x)$ 和 $g(x)$ ，则根据式 (4.6-63) 和图 4.6-20 可得

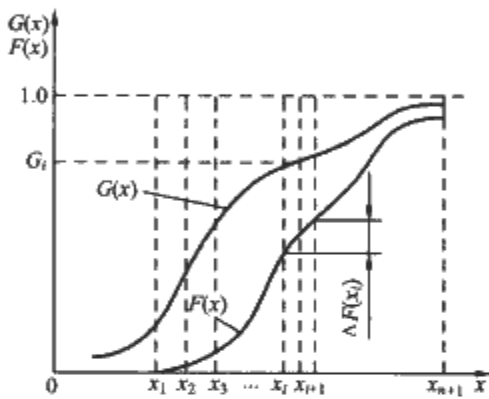


图 4.6-20 数值积分法计算可靠度

$$R = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f(x)[1 - G_y(x)]dx$$
$$= \int_{-\infty}^{\infty} f(x)G_y(x)dx \approx \sum_{i=1}^n \Delta F_i G_i \quad (4.6-72)$$

将图 4.6-20 横坐标在有效计算范围内分成 n 等份，并计算各等分区间应力分布函数中值 $G_i = [G(x_{i+1}) + G(x_i)]/2$ ，强度分布函数的差值 $\Delta F_i = F(x_{i+1}) - F(x_i)$ ，代入式 (4.6-72)，则可得可靠度计算公式为

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} [G(x_{i+1}) + G(x_i)] [F(x_{i+1}) - F(x_i)] \quad (4.6-73)$$

5.2 电器中杆件的可靠性设计

杆件是电器产品中常用的零部件。例如电器开关中的操作机构等都含有杆件。电器产品中杆件受力不太大，对其材料的强度要求也不太高，故常用 Q235 钢和 45 号钢。受轴向载荷时杆件的可靠性设计分为静强度及疲劳强度的可靠性设计，对于压杆，还需考虑其稳定性的可靠性设计。

在可靠性设计中要用到材料的一些性能数据，将 Q235 钢和 45 号钢的有关强度分布数据列于表 4.6-12 中。

表 4.6-12 Q235 钢及 45 号钢强度均值及变异系数

材料	抗拉强度均值 $\bar{\sigma}_b$ (MPa)	屈服极限均值 $\bar{\sigma}_s$ (MPa)	疲劳极限均值 $\bar{\sigma}_{-1}$ (MPa)	抗拉强度变异系数 V_{σ_b}	屈服极限变异系数 V_{σ_s}	同批材料的变异系数 V_1	材料疲劳极限的变异系数 $V_{\sigma_{-1}}$
Q235	458	273	217.2	0.09	0.09	0.038	0.098
45	636	383	254.2	0.07	0.07	0.021 3	0.073

5.2.1 杆件静强度的可靠性设计

对于某些受静应力或载荷波动很小，可按受静应力考虑的杆件，需要对其进行静强度的可靠性设计，即其强度指标按静强度指标来处理。下面给出其应力分布和强度分布的确定方法以及其可靠性设计的步骤。

5.2.1.1 静应力分布的确定

如图 4.6-21 所示的圆截面拉压杆，承受服从正态分布的随机载荷 (\bar{P}, S_P) ，设载荷波动很小，可以用静强度来处理。

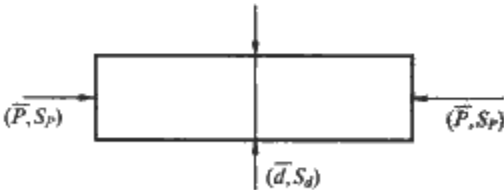


图 4.6-21 圆截面压杆

设杆件的横截面积为 (\bar{A}, S_A) ，则它所承受的随机应力为

$$(\bar{\sigma}_F, S_{\sigma_F}) = \frac{(\bar{P}, S_P)}{(\bar{A}, S_A)}$$

其中

$$\bar{\sigma}_F = \frac{\bar{P}}{\bar{A}}$$

$$S_{\sigma_F} = \frac{1}{\bar{A}^2} \sqrt{P^2 S_A^2 + \bar{A}^2 S_P^2}$$

这里 \bar{P} 、 \bar{A} 、 $\bar{\sigma}_F$ 表示载荷、横截面积及应力的均值， S_P 、 S_A 、 S_{σ_F} 为相应的标准离差。

设杆件的截面半径 r 为 (\bar{r}, S_r) ，一般取半径 r 的公差 $M = 0.015\bar{r}$ ，则按“3 σ 原则”， $S_r = M/3 = 0.005\bar{r}$ ，又因 $A = \pi r^2$ ，则有

$$\bar{A} = \pi \bar{r}^2$$

$$S_A = 2\pi \bar{r}$$

$$S_r = 0.01\pi \bar{r}^2$$

所以

$$\bar{\sigma}_F = \frac{\bar{P}}{\pi \bar{r}^2} \quad (4.6-74)$$

$$S_{\sigma_F} = \frac{1}{\pi \bar{r}^2} \sqrt{0.01^2 \bar{P}^2 + S_P^2} \quad (4.6-75)$$

5.2.1.2 静强度分布的确定

对杆件进行静强度的设计时，要用到其静强度的分布指标，对于 Q235 钢和 45 号钢的强度数据，可由表 4.6-12 中查取。因 Q235 钢和 45 号钢均为塑性材料，故以其屈服极

限 $\sigma_s(\bar{\sigma}_s, S_{\sigma_s})$ 作为静强度指标。

均值 $\bar{\sigma}_s$ 、变异系数 V_{σ_s} 按表 4.6-12 选取, 则标准离差

$$S_{\sigma_s} = \bar{\sigma}_s V_{\sigma_s} \quad (4.6-76)$$

5.2.1.3 杆件静强度可靠性设计的步骤

杆件静强度可靠性设计的联结方程为

$$z = \frac{\bar{\sigma}_s - \bar{\sigma}_F}{\sqrt{S_{\sigma_s}^2 + S_{\sigma_F}^2}} \quad (4.6-77)$$

$$R = \Phi(z) \quad (4.6-78)$$

利用以上两式进行杆件静载荷下的可靠性设计的步骤如下:

(1) 已知杆件尺寸及受力, 计算其可靠度 R 。

1) 由式(4.6-74)、式(4.6-75)计算应力分布 $(\bar{\sigma}_F, S_{\sigma_F})$ 。

2) 查表 4.6-12 得 $\bar{\sigma}_s$ 和 V_{σ_s} , 由式(4.6-76) 计算 S_{σ_s} , 从而确定强度分布 $(\bar{\sigma}_s, S_{\sigma_s})$ 。

3) 利用式(4.6-77) 计算 z 值。

4) 查标准正态分布表可得出 $\Phi(z)$, 或者由近似计算公式求出 $\Phi(z)$, 再由式(4.6-78)可求出可靠度 R 。

(2) 已知杆件受力, 求其可靠度为 R 时所需杆件尺寸。

1) 由式(4.6-78)得 $\Phi(z)$ 。

2) 查标准正态分布表或用近似计算公式求 z 。

3) 查表 4.6-12 得 $\bar{\sigma}_s$ 和 V_{σ_s} , 由式(4.6-76)求 S_{σ_s} , 从而确定强度分布 $(\bar{\sigma}_s, S_{\sigma_s})$ 。

4) 将 z 、式(4.6-74)、式(4.6-75)及强度分布 $(\bar{\sigma}_s, S_{\sigma_s})$ 代入式(4.6-77)中, 解得

$$\bar{r} = \sqrt{\frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2\pi A}} \quad (4.6-79)$$

$$A = z^2 S_{\sigma_s}^2 - \bar{\sigma}_s^2$$

$$B = 2\bar{P}\bar{\sigma}_s$$

$$C = (0.01^2 z^2 - 1)\bar{P}^2 + z^2 S_P^2$$

5) 计算公差 M , $M=0.015\bar{r}$ 。

6) 所求杆件半径即为 $\bar{r} \pm M$ 。

5.2.2 杆件疲劳强度的可靠性设计

杆件受到疲劳载荷作用时, 强度迅速下降, 造成疲劳断裂, 杆件的损坏也多为这种形式。因而需要对之进行疲劳强度的可靠性设计。在常规设计中, 当变应力的循环特征 γ ($\gamma = P_{\min}/P_{\max}$) 为常数时, 要用 Goodman 曲线(以平均值 σ_m 为横坐标, 以交变应力幅 σ_a 为纵坐标, 将应力循环系数 γ 为 $-1 \sim +1$ 间任意值时的强度极限连成曲线)计算其相当工作应力和相当疲劳极限, 从而进行设计。而在可靠性设计中, 将其相当工作应力和相当疲劳极限均作为随机变量考虑, 假定其服从正态分布, 故其 Goodman 曲线为一个分布的曲线带。应力分布和强度分布的关系如图 4.6-22 所示。

图 4.6-22 中, 曲线 1 上各点的纵横坐标之和为其强度极限均值 $\bar{\sigma}_\gamma$; $\bar{\sigma}_{-1}$ 为对称循环(即 $\gamma = -1$)下的强度极限均值; $\bar{\sigma}_0$ 为稳定应力(即 $\gamma = +1$)下的强度极限均值, 线上各点到原点距离为相当疲劳极限 $\bar{\sigma}_{\lim}$ ($\bar{\sigma}_{\lim} = \sqrt{\bar{\sigma}_a^2 + \bar{\sigma}_m^2}$); 曲线 2 和曲线 3 分别为按“3 σ 原则”确定的 $\bar{\sigma}_\gamma$ 的上、下限曲线; 曲线 4 为应力均值线, 其上、下限曲线未画, 线上每一点到原点距离为相当工作应力 $\bar{\sigma}_F$; 曲线 5 为应力循环系数 γ 为某一值时的射线, 它与横轴夹角用 θ 表示, 且有 $\tan\theta = \frac{1-\gamma}{1+\gamma}$ 。

进行疲劳强度可靠性设计时, 应力—强度干涉问题即为相当工作应力—相当疲劳极限的干涉问题。可见, 进行此设计的主要问题是计算相当工作应力和相当疲劳极限。下面给出相当工作应力及相当疲劳极限的确定方法, 并列杆件疲

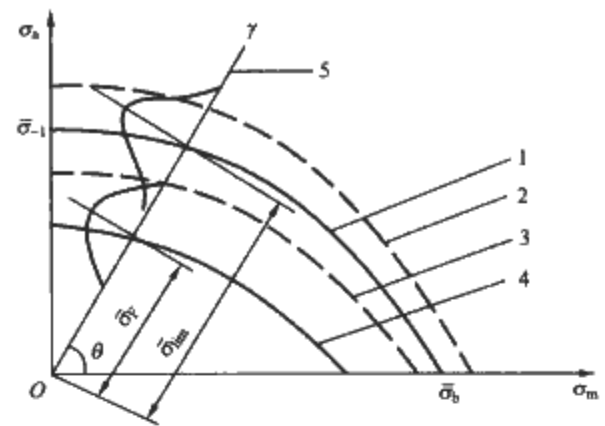


图 4.6-22 应力分布和强度分布的关系
1—均值 $\bar{\sigma}_\gamma$ 线; 2— $\bar{\sigma}_\gamma + 3S_{\sigma_\gamma}$ 线; 3— $\bar{\sigma}_\gamma - 3S_{\sigma_\gamma}$ 线;
4—应力线; 5—应力循环系数为 γ 的线

劳强度可靠性设计的步骤。

5.2.2.1 确定相当工作应力

设杆件受力为 $P_{\max} = P_1 \pm \Delta P_1$, $P_{\min} = P_2 \pm \Delta P_2$, 按“3 σ 原则”有

$$P_{\max} = (P_1, S_{P_1}) = (P_1, \frac{1}{3}\Delta P_1)$$

$$P_{\min} = (P_2, S_{P_2}) = (P_2, \frac{1}{3}\Delta P_2)$$

载荷循环系数 $\gamma = P_{\min}/P_{\max} = P_2/P_1$ (4.6-80)

载荷平均值

$$P_m = (\bar{P}_m, S_{P_m}) = \left(\frac{P_1 + P_2}{2}, \frac{1}{2}\sqrt{S_{P_1}^2 + S_{P_2}^2} \right) \quad (4.6-81)$$

载荷幅值

$$P_a = (\bar{P}_a, S_{P_a}) = \left(\frac{P_1 - P_2}{2}, \frac{1}{2}\sqrt{S_{P_1}^2 + S_{P_2}^2} \right) \quad (4.6-82)$$

则

$$\bar{P}_F = \sqrt{\bar{P}_m^2 + \bar{P}_a^2} \quad (4.6-83)$$

$$S_{P_F} = \left(\frac{\bar{P}_a^2 S_{P_a}^2 + \bar{P}_m^2 S_{P_m}^2}{\bar{P}_a^2 + \bar{P}_m^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.6-84)$$

相当工作应力

$$(\bar{\sigma}_F, S_{\sigma_F}) = \frac{(\bar{P}_F, S_{P_F})}{(\bar{A}, S_A)} \quad (4.6-85)$$

其中 (\bar{A}, S_A) 为杆件面积, 参见静强度时 (\bar{A}, S_A) 与 (\bar{r}, S_r) 的关系, 则可得到

$$\bar{\sigma}_F = \frac{\bar{P}_F}{\bar{A}} = \frac{\bar{P}_F}{\pi \bar{r}^2} \quad (4.6-86)$$

$$S_{\sigma_F} = \frac{1}{\bar{A}} \sqrt{0.01^2 \bar{P}_F^2 + S_{P_F}^2} \\ = \frac{1}{\pi \bar{r}^2} \sqrt{0.01^2 \bar{P}_F^2 + S_{P_F}^2} \quad (4.6-87)$$

5.2.2.2 确定相当疲劳极限

设计手册中往往只给出强度极限 σ_b 和屈服极限 σ_s , 以及对称循环下无限寿命时的弯曲疲劳极限 σ_{-1} , 而在可靠性设计中, 不仅这些量要作为随机变量, 考虑其变异系数, 而且还可能要对有限寿命、不对称循环下的问题进行设计, 这就要用到 S—N 曲线及 Goodman 曲线, 其相当疲劳极限的具体确定方法如下:

(1) 确定材料 S—N 曲线(应力—失效循环次数曲线)。S—N 曲线如图 4.6-23 所示。其中 S_3 是循环到 10^3 次时疲劳

极限, σ_{-II} 是材料无限寿命时对称循环下的拉压疲劳极限。常规设计中, 其数值可按式(4.6-88)和式(4.6-89)近似确定

$$S_3 = 0.9\sigma_b \tag{4.6-88}$$

$$\sigma_{-II} = 0.85\sigma_{-I} \tag{4.6-89}$$

在可靠性设计中, 以此值作为均值。

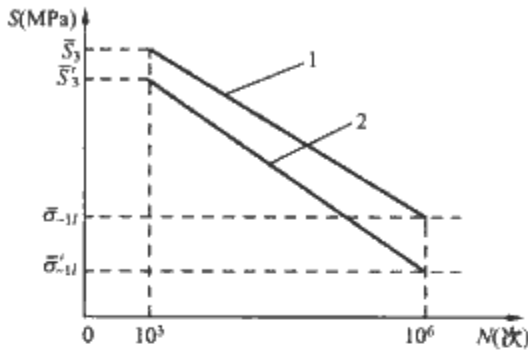


图 4.6-23 S—N 曲线
1—材料的 S—N 曲线; 2—零件的 S—N 曲线

(2) 确定零部件无限寿命时对称循环下的疲劳极限。根据材料疲劳极限确定零件疲劳极限时, 必须考虑各种因素对疲劳强度的综合影响。在计算中, 这些影响因素分别用应力集中系数 K_σ 、尺寸系数 ϵ 及表面质量系数 β 来加以考虑。这些参数的确定方法如下:

1) 应力集中系数 \bar{K}_σ 及其变异系数 V_{K_σ} 。在零件几何形状的突变处, 会产生局部的应力集中, 使零件在该处的疲劳极限明显降低, 其降低程度用有效应力集中系数 K_σ 表示。

\bar{K}_σ 按设计手册选用。按常规设计查到的 \bar{K}_σ 值比试验得到的实际应力集中系数大, 故计算偏于安全。缺乏试验数据时, 近似计算可取 V_{K_σ} 约为 0.057~0.076。

2) 尺寸系数 ϵ 及其变异系数 V_ϵ 。尺寸因素对零件疲劳极限的影响是基于材料存在“最薄弱环节”的概念。当受高应力的材料体积随着零件工作剖面尺寸的增大而增加时, “最薄弱环节”出现的概率也增加了, 因而实际疲劳极限降低。尺寸系数具有一定的离散性, 用变异系数 V_ϵ 表示 ($V_\epsilon = S_\epsilon / \bar{\epsilon}$)。对于碳素钢, 其尺寸系数的有关数据列于表 4.6-13。

表 4.6-13 碳素钢尺寸系数 ϵ 、 S_ϵ 及 V_ϵ					
$d(\text{mm})$	0~20	30~150	150~250	250~350	350 以上
ϵ	1	0.856 25	0.802 5	0.791 1	0.73
S_ϵ	0	0.088 95	0.047 734	0.034 44	0.041 88
V_ϵ	0	0.103 88	0.059 48	0.043 53	0.057 35

3) 表面质量系数 $\bar{\beta}$ 及其变异系数 V_β 。表面加工系数 β 是考虑零件的表面粗糙度不同于磨光试样而引入的系数, 它具有一定的分散性, 其变异系数用 V_β 表示 ($V_\beta = S_\beta / \bar{\beta}$)。表面加工系数 β 的有关数据列于表 4.6-14。

表 4.6-14 表面加工系数 $\bar{\beta}$ 、 S_β 及 V_β					
加工情况	磨光	抛光	车削	热轧	锻造
$\bar{\beta}$	1	1.123 2	0.794 8	0.529 1	0.377 3
S_β	0	0.040 61	0.038 58	0.091 41	0.078 07
V_β	0	0.036	0.048 5	0.172 8	0.206 9

确定这些参数后, 零件的疲劳极限由式(4.6-90)来求

$$\sigma'_{-II} = \frac{\sigma_{-II} \bar{\epsilon} \bar{\beta}}{\bar{K}_\sigma} \tag{4.6-90}$$

零件疲劳极限的变异系数为

$$V_{\sigma'_{-II}} = \sqrt{V_{\sigma_{-II}}^2 + V_{K_\sigma}^2 + V_\epsilon^2 + V_\beta^2} \tag{4.6-91}$$

$$V_{\sigma_{-II}} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2}$$

式中: σ'_{-II} 为零件对称循环时疲劳极限的均值; $V_{\sigma'_{-II}}$ 为零件疲劳极限的变异系数; $V_{\sigma_{-II}}$ 为材料疲劳极限的变异系数; V_1 为同批材料的变异系数; V_2 为不同批材料的变异系数, $V_2 \approx V_{\sigma_b}$ 。

将 Q235 钢和 45 号钢的 V_1 和 $V_{\sigma_{-II}}$ 也列于表 4.6-12 中, 以便查找。

式(4.6-90)适用于没有很大残余应力的零件。当缺乏 $V_{\sigma'_{-II}}$ 的直接数据时, 可取 $V_{\sigma'_{-II}}$ 约为 0.10~0.15 作近似计算。

(3) 确定零部件的 S—N 曲线。根据材料 S—N 曲线确定零件 S—N 曲线时, 在 S—N 曲线转折点处要考虑 K_σ , ϵ , β 的影响, 即在 $N \geq 10^6$ 时, σ'_{-II} 按式(4.6-90)计算; 而在 $N = 10^3$ 时, 要考虑有效应力集中系数 K'_σ 的影响, 尺寸系数和表面系数均取 1, 即不考虑其影响

$$K'_\sigma = 1 + b(K_\sigma - 1) \tag{4.6-92}$$

对于 Q235 钢和 45 号钢, 其 b 值分别为 0.2 和 0.34。若确定了 K_σ , 则 K'_σ 可由式(4.6-92)计算。当 $N = 10^3$ 次时

$$\bar{S}'_3 = \frac{\bar{S}_3}{\bar{K}'_\sigma} \tag{4.6-93}$$

这时, 零件的 S—N 曲线便可作出, 如图 4.6-23 所示。

(4) 确定 N 为 $10^3 \sim 10^6$ 次时零部件的疲劳极限 \bar{S}_N 及其变异系数 V_{S_N} 。图 4.6-23 只是给出了一条单一的 S—N 曲线, 实际上 S—N 曲线是有一定分散性的, 在可靠性设计中用的是分布化的 S—N 曲线, 如图 4.6-24 所示。

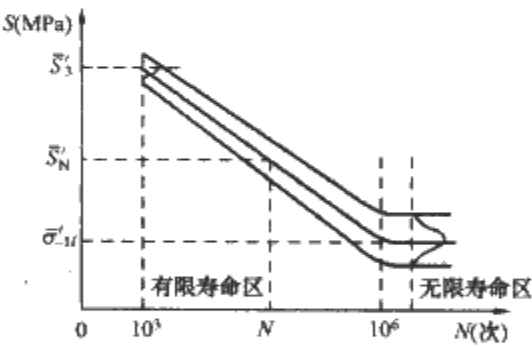


图 4.6-24 分布化的 S—N 曲线

由图 4.6-24 知, N 为 $10^3 \sim 10^6$ 次即在有限寿命区中, S—N 曲线在对数坐标下为一直线。故在寿命为 N 时, 其疲劳极限 \bar{S}_N 满足

$$\lg \bar{S}_N = \lg \bar{S}'_3 + \frac{\lg N - 3}{3} (\lg \sigma'_{-II} - \lg \bar{S}'_3) \tag{4.6-94}$$

现假设在有限寿命区中, 其变异系数呈线性变化, 则

$$V_{S_N} = V_{S'_3} + \frac{\lg N - 3}{3} (V_{\sigma'_{-II}} - V_{S'_3}) \tag{4.6-95}$$

式中: $V_{S'_3}$ 为 $N = 10^3$ 时疲劳极限变异系数, 当 $N = 10^3$ 次时, 可近似地取为 $S_{S_3} \approx 0.10\sigma_b$, 故 $V_{S_3} = S_{S_3} / \bar{S}_3 = 1/9$, 一般假设 $V_{S'_3} = V_{S_3}$; $V_{\sigma'_{-II}}$ 为 $N \geq 10^6$ 时零件疲劳极限变异系数, 前面已介绍其确定方法。

(5) 不对称循环时零部件疲劳极限 (σ_{lim} , $S_{\sigma_{lim}}$) 的确定。以上讨论的都是对称循环 ($\gamma = -1$) 时的疲劳极限, 而在设计工作中, 往往要用到不对称循环下的疲劳极限 σ_γ

$$\sigma_\gamma = \sigma_m + \sigma_a \tag{4.6-96}$$

式中: σ_m 为 σ_γ 的平均值; σ_a 为 σ_γ 的幅值。

传统设计中, σ_y 可由疲劳极限线图来确定。在可靠性设计中, 考虑到疲劳极限的分散性, 故用分布化的疲劳极限线图 (见图 4.6-22) 来确定所需各参数。

下面介绍一种用解析法求 σ_y 的方法, 此法不用作图, 在实际设计中, 可提高设计精度, 节约时间。这种方法更适用于用计算机编程设计, 因而是一种很重要的方法。现介绍如下:

对于碳钢及低合金钢的无应力集中试件, 其疲劳极限 σ_y 可近似描述为

$$\bar{\sigma}_y \text{ 线方程} \quad \frac{\bar{\sigma}_a}{\bar{\sigma}_{-1}} + \left(\frac{\bar{\sigma}_m}{\bar{\sigma}_b} \right)^2 = 1 \quad (4.6-97)$$

$$-3S_{\sigma_y} \text{ 线方程} \quad \frac{\sigma_a}{\bar{\sigma}_{-1} - 3S_{\sigma_{-1}}} + \left(\frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}_b - 3S_{\sigma_b}} \right)^2 = 1 \quad (4.6-98)$$

$$\tan \theta = \frac{1-\gamma}{1+\gamma} = \frac{\bar{\sigma}_a}{\bar{\sigma}_m} = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (4.6-99)$$

式中: $\bar{\sigma}_a$ 和 $\bar{\sigma}_m$ 为 $\bar{\sigma}_y$ 的幅值和平均值; $\bar{\sigma}_b$ 为静强度极限均值, 由表 4.6-12 查得; S_{σ_b} 为静强度极限标准离差, $S_{\sigma_b} = \sigma_b V_{\sigma_b}$; $\bar{\sigma}_{-1}$ 为 $\gamma = -1$ 下寿命 N 时的疲劳极限均值; $S_{\sigma_{-1}}$ 为 $\bar{\sigma}_{-1}$ 的标准离差, $S_{\sigma_{-1}} = \bar{\sigma}_{-1} V_{\sigma_{-1}}$, 其中 $V_{\sigma_{-1}}$ 为相应的疲劳极限变异系数; γ 为不对称循环系数。

有限寿命时

$$\bar{\sigma}_{-1} = \bar{S}_N$$

无限寿命时

$$\bar{\sigma}_{-1} = \bar{\sigma}'_{-1N} \quad (4.6-100)$$

式(4.6-97)、式(4.6-98)也称作 Gerber 准则。联解式(4.6-97)、式(4.6-99), 得

$$\bar{\sigma}_m = \frac{-\tan \theta b \pm \sqrt{(\tan \theta b)^2 + 4\bar{\sigma}_b^2}}{2} \quad (4.6-101)$$

$$\text{式中} \quad b = \frac{\bar{\sigma}_b^2}{\bar{\sigma}_{-1}}$$

联解式(4.6-98)、式(4.6-99), 得

$$\sigma_m = \frac{-\tan \theta b_1 \pm \sqrt{(\tan \theta b_1)^2 + 4(\bar{\sigma}_b - 3S_{\sigma_b})^2}}{2} \quad (4.6-102)$$

$$\text{式中} \quad b_1 = \frac{(\bar{\sigma}_b - 3S_{\sigma_b})^2}{\bar{\sigma}_{-1} - 3S_{\sigma_{-1}}}$$

在 $\bar{\sigma}_m$ 及 σ_m 计算中, 均取十号。

由式(4.6-99)得

$$\bar{\sigma}_a = \tan \theta \bar{\sigma}_m \quad (4.6-103)$$

$$\sigma_a = \tan \theta \sigma_m \quad (4.6-104)$$

到此为止, 可求得零件疲劳极限的平均应力 $\bar{\sigma}_m$ 和 σ_m , 以及应力幅值 $\bar{\sigma}_a$ 和 σ_a 。从而, 可得零件的疲劳极限均值为

$$\bar{\sigma}_y = \bar{\sigma}_m + \bar{\sigma}_a \quad (4.6-105)$$

零件的相当疲劳极限均值 $\bar{\sigma}_{lim}$ 和标准离差 $S_{\sigma_{lim}}$ 可按式(4.6-106)~式(4.6-108)计算, 即

$$\bar{\sigma}_{lim} = \sqrt{\bar{\sigma}_m^2 + \bar{\sigma}_a^2} \quad (4.6-106)$$

$$\sigma_{lim} = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_a^2} \quad (4.6-107)$$

$$S_{\sigma_{lim}} = \frac{\bar{\sigma}_{lim} - \sigma_{lim}}{3} \quad (4.6-108)$$

因此, 应用 Gerber 疲劳失效准则, 可近似求得循环特征为 γ 时的光滑试件相当疲劳极限 $\bar{\sigma}_{lim}$ 及 $S_{\sigma_{lim}}$, 为疲劳强度的可靠性设计提供了具有一定实用价值的近似数据。但

Gerber 准则没有考虑屈服强度的极限线, 因此, 还必须判别塑性材料是在疲劳区还是在屈服区工作。

由图 4.6-25 可知, 判别条件为: 当疲劳极限 $\bar{\sigma}_y \leq \bar{\sigma}_s$ 时, 极限应力为 $\bar{\sigma}_y$, 应进行疲劳强度的可靠性设计; 当疲劳极限 $\bar{\sigma}_y \geq \bar{\sigma}_s$ 时, 极限应力为 $\bar{\sigma}_s$, 应进行屈服静强度的可靠性设计。

总之, 应以零件不出现任何形式的失效为准则。

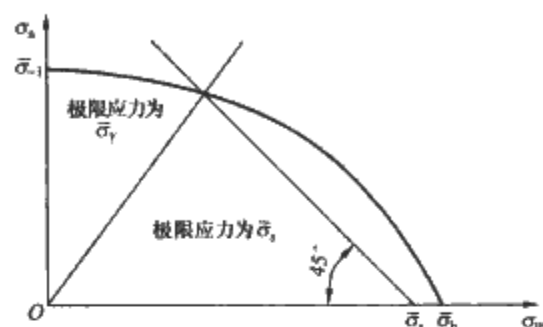


图 4.6-25 σ_a — σ_m 极限应力图

5.2.2.3 杆件疲劳强度可靠性设计问题的解题步骤

- (1) 给定杆件所载荷的最大、最小值及其寿命 N 。
- (2) 按式(4.6-86)、式(4.6-87)确定 $(\bar{\sigma}_F, S_{\sigma_F})$ 。
- (3) 确定相当疲劳极限。
 - 1) 按式(4.6-80)计算载荷循环系数 γ 。
 - 2) 查表 4.6-12 确定 $\bar{\sigma}_b$ 和 $\bar{\sigma}_{-1}$, 并由式(4.6-88)及式(4.6-89)计算 \bar{S}_3 、 $\bar{\sigma}_{-1N}$ 。
 - 3) 确定应力集中系数 \bar{K}_σ 和 V_{K_σ} 。对于直杆, 无应力集中现象, 故取 $\bar{K}_\sigma = 1$, $V_{K_\sigma} = 0$ 。
 - 4) 查表 4.6-13 确定尺寸系数 $\bar{\epsilon}$ 和 V_ϵ 。
 - 5) 查表 4.6-14 确定表面质量系数 $\bar{\beta}$ 和 V_β 。
 - 6) 按式(4.6-90)、式(4.6-91)计算 $\bar{\sigma}'_{-1N}$ 和 $V_{\sigma'_{-1N}}$ 。
 - 7) 按式(4.6-92)计算 \bar{K}'_3 。
 - 8) 按式(4.6-93)计算 \bar{S}_3 。
 - 9) 按式(4.6-94)、式(4.6-95)计算 \bar{S}_N 和 V_{S_N} 。
 - 10) 按式(4.6-101)~式(4.6-104)计算 $\bar{\sigma}_m$, σ_m , $\bar{\sigma}_a$, σ_a 。
 - 11) 按式(4.6-105)计算 $\bar{\sigma}_y$ 。
 - 12) 比较 $\bar{\sigma}_y$ 与 $\bar{\sigma}_s$, 确定是疲劳强度还是静强度设计问题。若 $\bar{\sigma}_y \leq \bar{\sigma}_s$, 则是疲劳强度问题, 按式(4.6-106)~式(4.6-108)计算 $(\bar{\sigma}_{lim}, S_{\sigma_{lim}})$; 若 $\bar{\sigma}_y \geq \bar{\sigma}_s$, 则是静强度问题, 其强度极限的确定见第 5.2.1 节。

注: $N \geq 10^6$ 时, 不用步骤 7)~9)。

(4) 对于静强度问题, 第 5.2.1 节已叙述, 这里只讨论疲劳强度的情况。杆件疲劳强度可靠性设计问题的联结方程为

$$z = \frac{\bar{\sigma}_{lim} - \bar{\sigma}_F}{\sqrt{S_{\sigma_{lim}}^2 + S_{\sigma_F}^2}} \quad (4.6-109)$$

式中: z 为联结系数。

现将疲劳强度可靠性设计的两类问题叙述如下:

- 1) 已知杆件尺寸, 计算寿命 N 时可靠度 R 。按式(4.6-86)及式(4.6-87)计算 $\bar{\sigma}_F$ 和 S_{σ_F} , 利用式(4.6-109)计算 z 值, 查标准正态分布表得 $\Phi(z)$, 从而 $R = \Phi(z)$ 。
- 2) 给定寿命为 N 时的可靠度 R , 确定杆件尺寸。由 $\Phi(z) = R$ 得 $\Phi(z)$; 查标准正态分布表可由 $\Phi(z)$ 得出 z ; 将 z 、式(4.6-86)、式(4.6-87)及 $(\bar{\sigma}_{lim}, S_{\sigma_{lim}})$ 代入联结方程(4.6-109)中, 求解 \bar{r} , 并确定 $\bar{r} \pm M$ 。其具体方法见第 5.2.1.3 节中第二类问题的 4)、5)、6)。

5.2.3 压杆稳定性的可靠性设计

在杆件的可靠性设计中,对于长径比 $\frac{l}{d}$ 相当大的受轴向压力的杆件(见图4.6-26),还需要进行稳定性校核。若满足稳定性要求,则杆件设计合理;否则,则需要按稳定性条件进行可靠性设计。

电器中杆件多为两端固定,对于这类杆件,其临界载荷(不致使压杆失稳的最大轴向载荷) P_{cr} 可按式(4.6-110)计算

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (4.6-110)$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

式中: E 为弹性模量; I 为极惯性矩; d 为压杆直径; l 为压杆长度。

因 E , I , l 均为随机变量,故 P_{cr} 也为随机变量,设 $P_{cr} \sim N(\bar{P}_{cr}, S_{P_{cr}})$, 则有

$$\bar{P}_{cr} = \frac{\pi^2 \bar{EI}}{\bar{l}^2} = 0.48447 \frac{\bar{E} \bar{d}^4}{\bar{l}^2} \quad (4.6-111)$$

其变异系数为

$$V_{P_{cr}} = \sqrt{V_E^2 + 16V_d^2 + 4V_l^2} \quad (4.6-112)$$

式中: V_E 为弹性模量 E 的变异系数, $V_E = 0.03$; V_d 为直径 d 的变异系数, $V_d = \frac{S_d}{\bar{d}} = V_r = 0.005$, V_r 为杆件半径变异系数; V_l 为杆长 l 的变异系数, $V_l = \frac{S_l}{\bar{l}}$ 。

$$\text{则} \quad S_{P_{cr}} = V_{P_{cr}} \bar{P}_{cr} \quad (4.6-113)$$

压杆稳定性的可靠度为

$$R = P(P_{cr} - P > 0) \quad (4.6-114)$$

式中: P 为轴向载荷。

其相应的联结方程为

$$z = \frac{\bar{P}_{cr} - \bar{P}}{\sqrt{S_{P_{cr}}^2 + S_P^2}} \quad (4.6-115)$$

$$R = \Phi(z) \quad (4.6-116)$$

式中: \bar{P} 和 S_P 为载荷均值及标准差; \bar{P}_{cr} 和 $S_{P_{cr}}$ 为临界载荷均值及标准差。

运用这些公式可解决下述两类问题:

- (1) 选定压杆稳定性的可靠度 R , 计算杆件直径 d 。
- (2) 对于已知直径 d 的杆件, 计算其压杆稳定性的可靠度 R 。

5.3 电器中弹簧的可靠性设计

弹簧是电器产品的关键零件,主要用作触头弹簧、缓冲元件及提供机构运动的动力。圆柱螺旋压缩弹簧在各种高低压电器产品中更为常用,例如在一台 CJ20 交流接触器中,至少要用到 10 个圆柱螺旋压缩弹簧。因而优良的电器产品是与弹簧的高可靠性分不开的。

本部分介绍电器中圆柱螺旋压缩弹簧可靠性设计的基本原理和方法及弹簧可靠性优化设计的数学模型。圆柱螺旋压

缩弹簧工作图如图 4.6-27 所示,弹簧的应力、强度及各设计参数均可认为服从正态分布,因而在设计时将之作为正态分布变量处理。

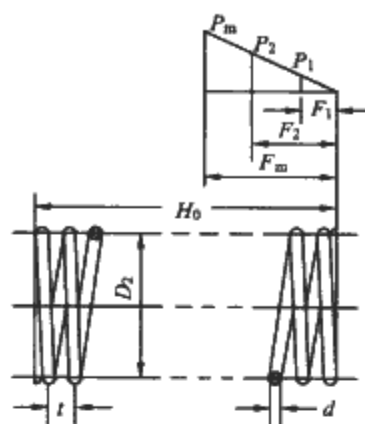


图 4.6-27 圆柱螺旋压缩弹簧工作图

5.3.1 最大剪应力分布的确定

5.3.1.1 以轴向载荷为主要参数

由常规设计可知,当螺旋弹簧受最大轴向载荷 P_{max} 时,其内侧的最大剪应力为

$$\tau_{max} = \frac{8kP_{max}D_2}{\pi d^3} \quad (4.6-117)$$

$$k = \frac{4c-1}{4c-4} + \frac{0.615}{c} \quad (4.6-118)$$

$$c = \frac{D_2}{d} \quad (4.6-119)$$

式中: d 为弹簧丝直径; D_2 为弹簧中径; c 为弹簧指数; k 为弹簧的曲度系数; P_{max} 为作用在弹簧上的最大轴向载荷。

由于簧丝直径 d 的公差及一些随机因素(如材料机械性能的差异、旋绕比的不同等)的影响,使卷绕后弹簧的回弹量不一致,造成簧圈尺寸的变化,这些尺寸的偏差将会引起较大的载荷偏差,故在可靠性设计中必须加以考虑。也就是说,在弹簧的可靠性设计中,几何尺寸也应作为随机变量处理。

剪应力的均值为

$$\bar{\tau}_{max} = \frac{8\bar{k}\bar{P}_{max}\bar{D}_2}{\pi\bar{d}^3} \quad (4.6-120)$$

式中: \bar{d} , \bar{D}_2 , \bar{k} , \bar{P}_{max} 分别为弹簧钢丝直径均值、弹簧中径均值、弹簧的曲度系数均值、作用在弹簧上的最大轴向载荷均值。

剪应力的变异系数为

$$V_{\tau_{max}} = \sqrt{V_{P_{max}}^2 + V_k^2 + V_{D_2}^2 + 9V_d^2} \quad (4.6-121)$$

式中: $V_{P_{max}}$, V_k , V_{D_2} , V_d 分别为 P_{max} , k , D_2 , d 的变异系数。

剪应力的标准离差为

$$S_{\tau_{max}} = \bar{\tau}_{max} V_{\tau_{max}} \quad (4.6-122)$$

各变量的均值及变异系数确定方法如下:

(1) 轴向载荷 P 。名义工作载荷就是载荷的均值 \bar{P} ; 载荷的变异系数 V_P 按载荷的允许偏差 $\pm \Delta P$ 确定。即

$$V_P = (\Delta P/3)/\bar{P} \quad (4.6-123)$$

(2) 曲度系数 k 。曲度系数的均值 \bar{k} 按式(4.6-118)计算。标准离差 S_k 可取 0.045, 则其变异系数

$$V_k = \frac{S_k}{\bar{k}} \quad (4.6-124)$$

(3) 弹簧中径 D_2 。弹簧中径均值 \bar{D}_2 按名义尺寸确定。对于冷拔碳钢和不锈钢,弹簧中径的标准离差可取 $S_{D_2} =$

0.0058 \bar{D}_2 ，所以其变异系数 $V_{D_2} = 0.0058$ 。

(4) 簧丝直径 d 。簧丝直径均值 \bar{d} 为其名义尺寸，其标准离差 S_d 按规定的公差及“3 σ 原则”确定，其变异系数

$$V_d = \frac{S_d}{\bar{d}} \quad (4.6-125)$$

5.3.1.2 以弹簧的变形量 (F) 为主要参数
弹簧变形量为

$$F = \frac{8PD_2^3 n}{d^4 G} \quad (4.6-126)$$

所以

$$\bar{\tau}_{\max} = \frac{k d G \bar{F}_{\max}}{\pi \bar{D}_2^3 \bar{n}} \quad (4.6-127)$$

式中： G 为弹簧材料的剪切弹性模量，其均值 \bar{G} 可根据材料手册查出，其变异系数 V_G 可取 0.03； \bar{n} 为弹簧有效圈数均值； \bar{F}_{\max} 为弹簧的最大变形量均值。

其变异系数可取 $V_{\tau_{\max}}$ 为 0.015~0.05。

5.3.2 强度分布的确定

5.3.2.1 确定静强度分布

在圆柱压缩螺旋弹簧的静强度设计中，极限应力就是弹簧材料的扭转屈服极限 τ_s ，而设计手册中往往只给出 σ_b ，因而需要根据 σ_b 确定 τ_s 值。其方法如下：

τ_b 与 σ_b 的关系为

$$\begin{cases} \tau_b = 0.8\sigma_b & (c \leq 4) \\ \tau_b = 0.7\sigma_b & (4 < c \leq 6) \\ \tau_b = 0.6\sigma_b & (c > 6) \end{cases} \quad (4.6-128)$$

式中： τ_b 为剪切强度极限， $\tau_b \sim N(\bar{\tau}_b, S_{\tau_b})$ 。

τ_s 与 τ_b 的关系为

$$\tau_s = \alpha \tau_b \quad (4.6-129)$$

其中

$$\alpha \sim N(0.9, 0.03)$$

即

$$\bar{\tau}_s = 0.9\bar{\tau}_b \quad (4.6-130)$$

$$S_{\tau_s} = (\bar{\tau}_b^2 S_{\alpha}^2 + \alpha^2 S_{\tau_b}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4.6-131)$$

其中 $S_{\alpha} = 0.03$ ， $S_{\tau_b} \approx 0.05\bar{\tau}_b$ ，所以

$$S_{\tau_s} \approx 0.054\bar{\tau}_b \quad (4.6-132)$$

5.3.2.2 确定疲劳强度分布

弹簧的疲劳强度与载荷不对称系数 γ 及工作寿命 N 有关。不同的不对称系数下的疲劳强度可由极限应力图得到，不同工作寿命时的脉动疲劳强度可由脉动疲劳强度曲线求得。

5.3.2.2.1 疲劳强度的极限应力图

弹簧所受应力的最大值 $\bar{\tau}_{\max}$ 与最小值 $\bar{\tau}_{\min}$ 之比 γ 称为载荷不对称系数，即

$$\gamma = \frac{\bar{\tau}_{\min}}{\bar{\tau}_{\max}} \quad (4.6-133)$$

对于压簧， $\gamma \geq 0$ 。 $\gamma = 0$ 时，即 $\bar{\tau}_{\min} = 0$ ，这类应力称为脉动循环应力，对应的材料疲劳极限用 $\bar{\tau}_0$ 表示； $\gamma = 1$ 时，即 $\bar{\tau}_{\min} = \bar{\tau}_{\max}$ ，这类应力为静应力，对应的材料极限为屈服极限，用 $\bar{\tau}_s$ 表示。

为了表示材料或零件在各种变应力作用下的抵抗能力，将对应于各种变应力的极限应力用图形表示出来，称为极限应力图。以最小应力 $\bar{\tau}_{\min}$ 和最大应力 $\bar{\tau}_{\max}$ 表示的 $\bar{\tau}_{\min}$ — $\bar{\tau}_{\max}$ 极限应力图，又称古德曼 (Goodman) 极限应力图。 $\bar{\tau}_{\min}$ — $\bar{\tau}_{\max}$ 极限应力图表示出了对应于各种变应力的极限应力，如图 4.6-28 所示。

图 4.6-28 中， $\bar{\tau}_b$ 为材料的剪切强度极限， OC 线为 $\gamma = 1$ ， OB 线为 $\gamma = 0$ 。 γ_1 ， γ_2 ， γ 为三个不同的循环特征， BD 段为材料的疲劳极限连线， DG 段为材料的屈服极限连线。为安全起见，设计时总考虑其较小的极限值。由图 4.6-28 可见，当循环特征 γ 为 $0 \sim \gamma_2$ 时，屈服极限大于疲劳极限，故应考虑用疲劳极限；当 $\gamma_2 < \gamma < 1$ 时，屈服极限小于疲劳极限，故应考虑用屈服极限。所以 γ_2 为临界值，用 γ_{lin} 表示，由图 4.6-28 可推出

$$\gamma_{lin} = \frac{\bar{\tau}_s - \bar{\tau}_0}{\bar{\tau}_b - \bar{\tau}_0} \times \frac{\bar{\tau}_b}{\bar{\tau}_s} \quad (4.6-134)$$

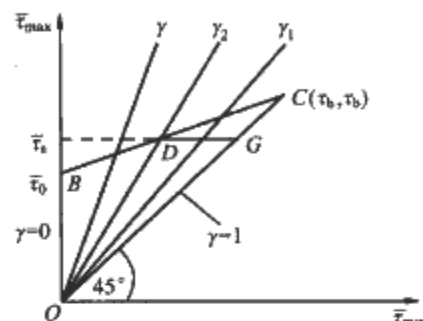


图 4.6-28 $\bar{\tau}_{\min}$ — $\bar{\tau}_{\max}$ 极限应力图

设对应于某一循环特征 γ 的疲劳极限为 \bar{S}_m ，若 $0 \leq \gamma \leq \gamma_{lin}$ ，则

$$\bar{S}_m = \frac{\bar{\tau}_0 \bar{\tau}_b}{\bar{\tau}_b - \gamma(\bar{\tau}_b - \bar{\tau}_0)} \quad (4.6-135)$$

$$S_{S_m} = V_{\tau_0} \bar{S}_m \quad (4.6-136)$$

式中： V_{τ_0} 为脉动循环疲劳极限应力的变异系数，假设对于同一寿命 N ，其疲劳极限应力的变异系数相同。

若 $\gamma_{lin} \leq \gamma \leq 1$ ，则

$$\bar{S}_m = \bar{\tau}_s \quad (4.6-137)$$

$$S_{S_m} = S_{\tau_s} \quad (4.6-138)$$

由以上分析可知，绘制弹簧的极限应力图，需要有脉动循环疲劳极限 $\bar{\tau}_0$ ，剪切强度极限 $\bar{\tau}_b$ 及屈服极限 $\bar{\tau}_s$ 等数据。其中 $\bar{\tau}_b$ 和 $\bar{\tau}_s$ 可由静强度数据求得；而脉动循环疲劳极限 $\bar{\tau}_0$ 与循环次数 (寿命) N 有关，它可由脉动疲劳强度曲线 ($\bar{\tau}_0$ — N 曲线) 求得。

5.3.2.2.2 $\bar{\tau}_0$ — N 曲线

弹簧的脉动疲劳强度分布曲线如图 4.6-29 所示。

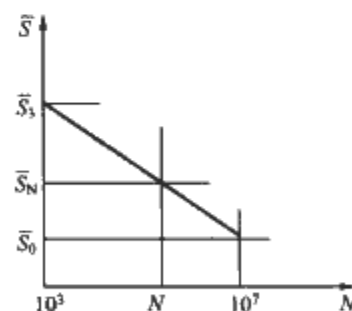


图 4.6-29 弹簧的脉动疲劳强度分布曲线

当 $N = 10^3$ 时，疲劳强度分布为 $S_3(\bar{S}_3, S_{S_3})$

$$S_3 = \beta \sigma_b \quad (4.6-139)$$

当 $c \leq 4$ 时， $\beta \sim N(0.72, 0.02)$ ；当 $4 < c \leq 6$ 时， $\beta \sim N(0.63, 0.02)$ ；当 $c > 6$ 时， $\beta \sim N(0.54, 0.02)$ 。

其中 c 为旋绕比。所以

$$\bar{S}_3 = \beta \bar{\sigma}_b \quad (4.6-140)$$

$$S_{S_3} = [\sigma_b^2 \beta^2 + \beta^2 S_{\sigma_b}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (4.6-141)$$

式中 $S_{\sigma_b} \approx 0.05\bar{\sigma}_b$

其变异系数为

$$V_{S_3} = \frac{S_{S_3}}{\bar{S}_3} \quad (4.6-142)$$

当 $N=10^7$ 时, 弹簧的剪切持久极限分布为 $S_0(\bar{S}_0, S_{S_0})$

$$\bar{S}_0 = 0.3K_f K_e \bar{\sigma}_b \quad (4.6-143)$$

$$K_e = 1 + K_p + K_h$$

式中: K_f 为应力集中修正系数, 可由图 4.6-30 查得; K_e 为工艺系数; K_p 为喷丸强化系数; $K_p=0.2$; K_h 为热压强化系数, $K_h=0.2$ 。

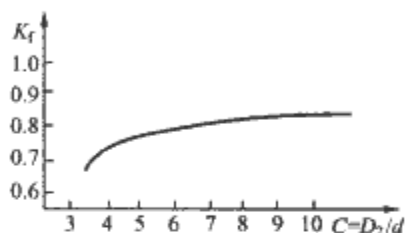


图 4.6-30 应力集中修正系数曲线

考虑到 σ_b 的分布, 可取

$$S_{S_0} = 0.05\bar{S}_0 \quad (4.6-144)$$

其变异系数为

$$V_{S_0} = 0.05 \quad (4.6-145)$$

假设当 $10^3 \leq N < 10^7$ 次时的变异系数 $V_{S_N} = \frac{S_{S_N}}{\bar{S}_N}$ 为直线变化, 则

$$V_{S_N} = V_{S_3} + \frac{\lg N - 3}{4}(V_{S_0} - V_{S_3}) \quad (4.6-146)$$

同理, 假设在任意寿命 N 时的剪切疲劳强度 \bar{S}_N 按直线变化(对数坐标系), 则

$$\lg \bar{S}_N = \lg \bar{S}_3 + \frac{\lg N - 3}{4}(\lg \bar{S}_0 - \lg \bar{S}_3) \quad (4.6-147)$$

当 $N \geq 10^7$ 次时

$$\bar{S}_N \approx \bar{S}_0 \quad (4.6-148)$$

这样可求得有限寿命时的脉动剪切疲劳强度 $S_N(\bar{S}_N, S_{S_N})$, 即寿命为 N 时的脉动剪切疲劳强度为

$$\tau_0 = S_N(\bar{S}_N, S_{S_N}) \quad (4.6-149)$$

5.3.3 弹簧可靠性设计的基本公式

根据应力—强度干涉模型, 弹簧可靠性设计的联结方程为

$$z = \frac{\bar{S}_m - \bar{\tau}_{\max}}{\sqrt{S_{S_m}^2 + S_{\tau_{\max}}^2}} \quad (4.6-150)$$

$$R = \Phi(z) \quad (4.6-151)$$

式中: \bar{S}_m 为弹簧的疲劳强度均值(与载荷不对称系数 γ 值及 N 值有关); $\bar{\tau}_{\max}$ 为弹簧所承受的最大剪切应力均值; S_{S_m} 为弹簧疲劳强度的标准离差; $S_{\tau_{\max}}$ 为弹簧所承受的最大剪切应力标准离差。

5.3.4 弹簧可靠性优化设计的数学模型

弹簧的可靠性设计需要计算应力分布和强度分布, 而应力分布和强度分布与弹簧的主要尺寸 d 有关, 所以在设计时需先假定 d 值, 计算完其他尺寸后再进行校验 d 选取的是否合适, 故设计为一个反复的过程, 要得到一个满足所有

条件的设计非常困难, 而得到的设计也只是可行方案中的一种, 还不一定是最佳的, 故对弹簧的可靠性设计采用优化设计技术非常必要。

对弹簧进行可靠性优化设计, 需要根据不同的要求, 建立不同的数学模型。当要求设计弹簧的可靠性最高时, 应以追求高可靠性为目标; 当要求设计的弹簧在满足一定的可靠度下, 用材最省或质量最轻时, 应以可靠度要求为约束条件, 以材料体积或质量为目标函数, 其他约束条件相同。

5.3.4.1 选取设计变量

设计弹簧时, 主要是根据最大工作载荷、最大变形、载荷不对称系数、工作寿命和结构要求等来确定钢丝直径、中径、工作圈数、节距或螺旋升角和高度等, 而后三者通常可由前三者导出。所以取弹簧的钢丝直径、中径、工作圈数为设计变量, 即

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{d} \\ \bar{D}_2 \\ \bar{n} \end{bmatrix} \quad (4.6-152)$$

5.3.4.2 目标函数

(1) 以可靠度为目标函数。由式(4.6-150)、式(4.6-151)可知 $R = \Phi(z)$, 而 $z \geq 0$, 所以 R 与 z 成正比。为了避免编程时需要查标准正态函数分布表, 可将以 R 最大为目标转化为以 z 最大为目标, 或以 $\frac{1}{z}$ 最小为目标, 即目标函数为

$$f(X) = \frac{1}{z} = \frac{\sqrt{S_{S_m}^2 + S_{\tau_{\max}}^2}}{\bar{S}_m - \bar{\tau}_{\max}} \quad (4.6-153)$$

(2) 以质量为目标, 以可靠度为约束条件。以弹簧的质量最小作为最优化设计目标时, 目标函数可表达为

$$f(X) = \frac{\pi^2}{4} \bar{d}^2 \bar{D}_2 \bar{n} \bar{\rho} \quad (4.6-154)$$

式中: $\bar{\rho}$ 为钢丝材料的密度。

其可靠度约束为

$$R \geq R_{gd} \quad (4.6-155)$$

式中: R_{gd} 为工作寿命 N 时要求的可靠度。

5.3.4.3 其他约束条件

电器中常要求弹簧自由长度 H_0 、安装高度 H_1 、最大变形时高度 H_2 一定, 而其最大载荷与最小载荷允许有一定的偏差。因此设计时用式(4.6-120)计算剪切应力, 其要满足的约束条件如下:

(1) 根据弹簧钢丝的产品尺寸规格, 给出弹簧钢丝直径的限制范围为

$$d_{\min} \leq d \leq d_{\max} \quad (4.6-156)$$

(2) 根据弹簧安装空间对其中径的限制范围为

$$D_{2\min} \leq D_2 \leq D_{2\max} \quad (4.6-157)$$

(3) 根据对工作圈数的规定范围为

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \quad (4.6-158)$$

(4) 根据旋绕比(弹簧指数) $c = D_2/d$ 的要求范围为

$$6 \leq c \leq 10 \quad (4.6-159)$$

(5) 在安装高度时载荷应满足的范围为

$$P_{\min} - \Delta P_{\min} \leq P_1 \leq P_{\min} + \Delta P_{\min} \quad (4.6-160)$$

(6) 在最大压缩高度时载荷应满足的范围为

$$P_{\max} - \Delta P_{\max} \leq P_2 \leq P_{\max} + \Delta P_{\max} \quad (4.6-161)$$

(7) 弹簧刚度要求的范围为

$$K_{\min} \leq K \leq K_{\max} \quad (4.6-162)$$

(8) 弹簧节距应满足的范围为

$$0.3D_2 \leq t = \frac{H_0 - 1.5d}{n} \leq 0.55D_2 \quad (4.6-163)$$

(9) 满足稳定条件为

$$b = \frac{H_0}{D_2} \leq 5.3 \quad (4.6-164)$$

式中: b 为弹簧的细长比; H_0 为弹簧的自由高度。

(10) 满足最大载荷下不碰圈的要求为

$$H_2 \geq H_b = (n + 1.5)d \quad (4.6-165)$$

式中: H_b 为弹簧并紧高度。

6 电器电磁系统可靠性设计

6.1 电器电磁系统可靠性设计的基本原理

吸合电压值是电器产品的一个重要参数。为了保证电器产品能可靠工作,标准中规定其吸合电压值 U_x 应不大于吸合电压允许值 U_{xy} 。在电器电磁系统设计时,励磁线圈加某一电压时电磁系统能可靠吸合为约束条件之一,选取这一吸合电压值应是设计的关键。因如果设计时这个电压取得太高,按设计最优解加工出样品后,由于制造误差及材料性能的分散性,将会使一部分产品吸合电压不能满足要求而成为不合格品。如果这个电压选得太低,正常工作时,会使吸合过程中二次碰撞时速度太高,降低机械寿命和电寿命。因而在电器电磁系统可靠性设计中,以吸合电压作为考核指标。

本节将介绍电器电磁系统吸合可靠性的基本理论、建立吸合可靠度与吸合电压之间的函数关系、给出电器电磁系统可靠性设计的基本方法。

6.1.1 电器电磁系统吸合可靠性的基本理论

在电器产品的生产中,由于一些随机因素(如加工过程、公差配合、导磁体材料性能、反力的分散性等)的影响,使得同一型号电器产品的吸合电压值存在着一定的分散性。因而吸合电压值 U_x 是一个随机变量,若其不大于吸合电压允许值 U_{xy} ,即 $U_x \leq U_{xy}$ 时为合格品;若其大于吸合电压允许值 U_{xy} ,即 $U_x > U_{xy}$ 时为不合格品。按吸合电压这一指标来考虑电器产品的可靠度 R 时,则可靠度 R 为 $U_x \leq U_{xy}$ 的概率,即

$$R = P(U_x \leq U_{xy}) \quad (4.6-166)$$

6.1.2 吸合电压数据处理及所服从的分布类型的确定

吸合电压的测量应按有关标准进行,得到吸合电压数据后可按本篇前面章节介绍的方法进行分布类型的估计及检验。注意:在使用 $K-S$ 检验法进行检验时要先将子样观察值从小到大进行排序。

一般情况下,可认为吸合电压服从正态分布。

6.1.3 应用应力—强度干涉模型建立吸合可靠度与吸合电压之间的函数关系

假设某型号电器产品吸合电压 U_x 服从参数为 $(\mu_{U_x}, \sigma_{U_x})$ 的正态分布,即 $U_x \sim N(\mu_{U_x}, \sigma_{U_x}^2)$,吸合电压允许值 U_{xy} 一般为额定电压 U_e 的某一倍数或为某一给定数值。按应力—强度干涉理论,吸合电压 U_x 可看作应力,而吸合电压允许值 U_{xy} 可看作强度。吸合可靠度 $R = P(U_x \leq U_{xy})$,即 $R = P(U_x - U_{xy} \leq 0)$ 。由概率论和数理统计知识可知,变量 $\xi = U_x - U_{xy}$ 也服从正态分布

$$\mu_{\xi} = \mu_{U_x} - U_{xy} \quad (4.6-167)$$

$$\sigma_{\xi} = \sqrt{\sigma_{U_x}^2} = \sigma_{U_x} \quad (4.6-168)$$

$$\text{则 } z = -\frac{\mu_{U_x} - U_{xy}}{\sigma_{U_x}} \quad (4.6-169)$$

式中: z 为联结系数。

可靠度 R 与 z 之间的关系可按式(4.6-170)由累积标准正态分布函数表查得

$$R = \Phi(z) \quad (4.6-170)$$

按照上述基本原理,可以判断现有电器吸合电压的可靠度,也可以给定某一吸合电压的可靠度进行电磁系统可靠性设计。这两方面内容均属于可靠性设计的范畴。

6.1.4 电器电磁系统可靠性设计的基本方法

电器电磁系统的吸合可靠性设计分为两类问题。

(1) 第一类问题。对于第一类问题——计算现有电器吸合电压的可靠度比较容易。只需随机地从多批(考虑到不同批生产的电器产品的吸合电压的分散性可能不同)生产的某型号电器产品中抽取若干只,测量其吸合电压值,而后运用数理统计的方法对之进行处理,计算其吸合电压均值 μ_{U_x} 及标准离差 σ_{U_x} 。而吸合电压允许值 U_{xy} 是某一定值,故按式(4.6-169)可求出联结系数 z ,再按式(4.6-170)查标准正态分布表计算出可靠度 R 。

(2) 第二类问题。可靠性设计的第二类问题为给定吸合电压的可靠度进行电器电磁系统的设计。换句话说,就是要求所设计出的电磁系统的吸合电压的可靠度必须满足给定的要求。这一类问题比较复杂,它需要分以下三步:

1) 确定吸合电压的变异系数 V_{U_x} 。由第一类问题知,对于同批或不同批生产的电器,其吸合电压间总存在着一定的离散性,为表征其离散性的程度,参照机械可靠性设计理论,将其标准离差与均值的比值定义为吸合电压的变异系数,用 V_{U_x} 表示。即

$$V_{U_x} = \frac{\sigma_{U_x}}{\mu_{U_x}} \quad (4.6-171)$$

式中: μ_{U_x} 与 σ_{U_x} 分别为某型号电器吸合电压的均值与标准离差。

对于老产品的改型设计,可按老产品的吸合电压数据求出变异系数,以此作为改型产品的变异系数;对于新产品设计,其吸合电压样本是不可能实际测出来的,因而只能参照类似结构及生产工艺的现有型号产品的变异系数,这样确定的新产品吸合电压变异系数比较合理。

2) 计算可靠性设计用的吸合电压均值 μ_{U_x} 。假设要求所设计的电磁系统的吸合电压可靠度 R 为某一值,则由标准正态分布表可查出联结系数 z ;再由变异系数的定义可得 $\sigma_{U_x} = \mu_{U_x} V_{U_x}$,代入式(4.6-169)得

$$\mu_{U_x} = \frac{U_{xy}}{1 + zV_{U_x}} \quad (4.6-172)$$

式中, z , U_{xy} , V_{U_x} 均为已知,故可求出 μ_{U_x} ,即为可靠度为 R 时的可靠吸合电压值 U_R 。

对于某型号交流接触器, $U_{xy} = 323\text{V}$, $V_{U_x} = 0.023$,如要求 $R = 0.99999$,则 $z = 4.265$,故 $\mu_{U_x} = 294.15\text{V}$ 。

3) 设计电磁系统。在电磁系统可靠性设计中,用 U_R 作为吸合电压的设计值来进行设计,所设计出的电磁系统在线

圈励磁电压为 U_R 时刚能吸合, 这样可保证设计出的电磁系统吸合可靠度为 R 。

6.2 电器电磁系统可靠性优化设计

6.2.1 电器电磁系统可靠性优化设计的基本原理

电器电磁系统可靠性优化设计的目标函数可以分为两类: 一类为以吸合可靠度为目标, 即追求吸合可靠度最高的目标; 另一类为在一定的吸合可靠度下, 以电器的成本最低、体积最小、质量最轻或其他性能指标最佳为目标。这两类问题的约束条件和求解过程不同, 下面分别进行叙述。

6.2.1.1 以吸合可靠度最高为目标

(1) 目标函数。以追求吸合可靠度最高为目标, 即为求 R 最大问题。因 $R = \Phi(z)$ 为增函数, 故此时最优化问题可转化为以求 z 最大为目标函数。

由式(4.6-169)可知, z 越大, 吸合电压均值越小, 故此问题可转化为求吸合电压值最小的电磁系统, 即 $\min \mu_{U_x}$ 。

(2) 约束条件。约束条件是设计方案所应满足的技术条件。不同用途的电磁系统所应满足的技术条件是不同的, 因此, 其约束条件也不同。下面介绍几种常见的约束条件。

1) 线圈温升约束。电器电磁系统的线圈在工作时消耗功率, 产生热量, 具有一定的温升。如果温升超过一定值, 就会引起线圈老化, 绝缘性能降低, 严重时可能烧坏线圈。因此, 为保证电磁系统能可靠地工作, 产品标准规定了电器的最高允许温升。所以在设计电磁系统时, 应保证电器线圈温升小于允许值, 即

$$\tau_{\max} \left| \begin{array}{l} \delta = \delta_{\min} \\ U = K_u U_e \end{array} \right. \leq \tau_m \quad (4.6-173)$$

式中: τ_m 为最高允许温升; τ_{\max} 为最高温升; K_u 为最高工作电压系数, 因电网电压是有波动的, 在最高工作电压($K_u U_e$)下温升最高, 故在 $K_u U_e$ 下进行温升计算; δ_{\min} 为闭合位置的气隙长度, 即应计算闭合工作时的温升。

2) 磁感应强度约束。由于磁化曲线的非线性, 当磁感应强度大于某一值时, 磁场强度会大幅增加。为了避免电磁系统工作在饱和状态, 设计电磁系统时一般规定最高磁感应强度 $B_{\max}(X)$ 不超过允许值 B_m , 即

$$B_{\max}(X) \leq B_m \quad (4.6-174)$$

式中: B_m 为最大允许磁感应强度; $B_{\max}(X)$ 为电磁系统中最大磁感应强度, 应在最高工作电压($K_u U_e$)下进行磁场分析或磁路计算求得。

(3) 优化求解计算。此问题的求解过程为: 给出一组设计变量值, 得到一个电磁系统, 计算此电磁系统是否满足约束条件。若不满足约束条件, 则此方案不可行, 按优化方法重新给出一组设计变量值, 再进行计算。若满足约束条件, 则进行电磁系统吸合电压的计算。

电磁系统吸合电压的计算可用一维搜索法进行。其程序框图如图4.6-31所示。

若以静态情况考虑可否吸合, 需判断静态吸力是否大于反力。若以动态情况来考虑, 则程序中应计算电磁系统吸合时的动态过程, 并考虑其速度应大于或等于零等约束。

对于每一组可行解, 均可得到一个吸合电压值。可按照优化方法不断地给出设计方案, 并进行比较, 从而得到最佳方案, 即吸合电压值最小的方案。此方案的吸合可靠度最高。

6.2.1.2 满足一定吸合可靠度要求时以性能指标最佳为目标

这类问题即设计满足吸合可靠度要求的最佳电磁系统。

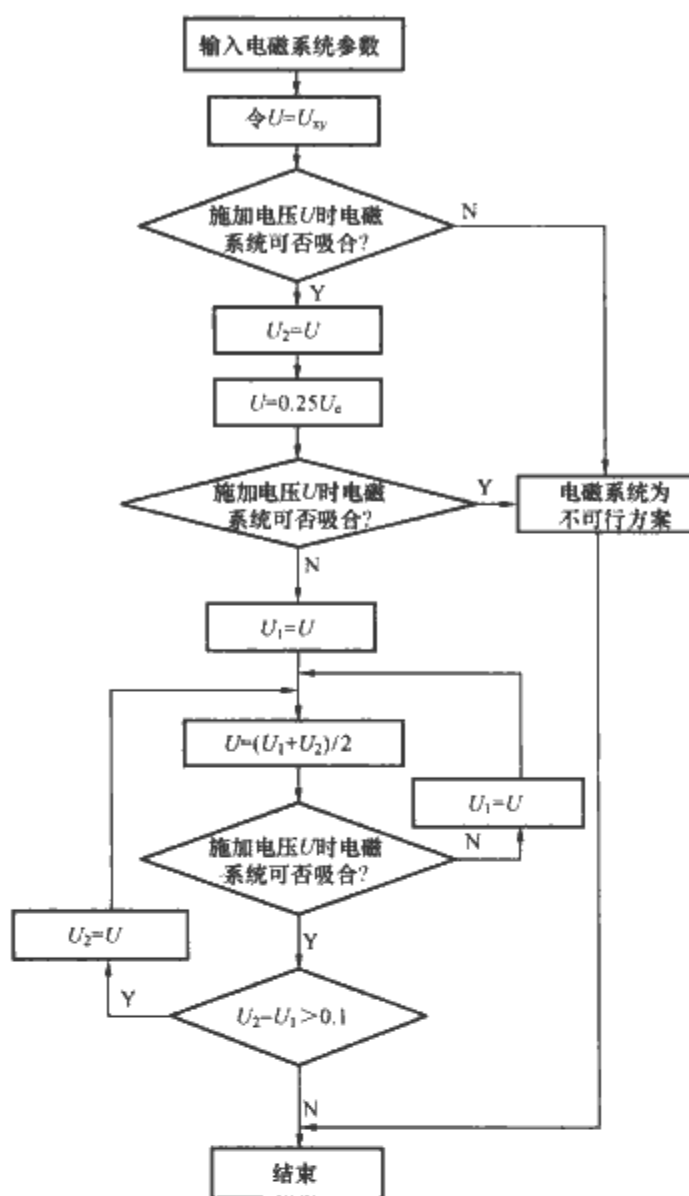


图 4.6-31 电磁系统吸合电压一维搜索法程序框图

对于这类问题, 首先需要计算可靠吸合电压值 U_R , 然后确定目标函数和约束条件, 建立可靠性优化设计数学模型。其目标函数和约束条件的选取如下。

(1) 目标函数。

1) 材料体积最小。电磁系统的材料体积是指铁磁材料和线圈铜导线体积之和, 即

$$V(X) = V_{Fe}(X) + V_{Cu}(X) \quad (4.6-175)$$

式中: $V_{Fe}(X)$ 为铁磁材料体积; $V_{Cu}(X)$ 为线圈铜导线体积。

2) 质量最小。在交通运输和航天等领域中, 往往要求电磁系统的质量越小越好。应用于这些领域电磁系统的优化设计, 可以建立下列目标函数

$$m(X) = m_{Fe}(X) + m_{Cu}(X) = \rho_{Fe} V_{Fe}(X) + \rho_{Cu} V_{Cu}(X) \quad (4.6-176)$$

式中: $m_{Fe}(X)$ 为铁磁材料质量; $m_{Cu}(X)$ 为线圈铜导线质量; ρ_{Fe} 为铁磁材料密度; ρ_{Cu} 为线圈铜导线密度。

3) 材料成本最低。电磁系统的材料成本主要是指铁磁材料与线圈铜导线成本之和。此时的目标函数为

$$C(X) = C_{Fe}(X) + C_{Cu}(X) = \sigma_{Fe} m_{Fe}(X) + \sigma_{Cu} m_{Cu}(X) \quad (4.6-177)$$

式中: $C_{Fe}(X)$ 为铁磁材料成本; $C_{Cu}(X)$ 为线圈铜导线成本; σ_{Fe} 为单位质量铁磁材料成本; σ_{Cu} 为单位质量线圈铜导线成本。

在满足一定设计要求的条件下, 设计出材料成本最低的电磁系统, 无疑会给生产厂家带来直接的经济效益。因此, 电磁系统的材料成本是电磁系统优化设计中最常用的目标函数之一。

4) 功率损耗最小。电磁系统是电器产品的主要耗能部

件,所以降低电磁系统的损耗功率可以节约能源,同时还可以降低线圈温升。此类优化设计问题的目标函数为

$$P(X)=P_{Fe}(X)+P_{Cu}(X) \quad (4.6-178)$$

式中: $P_{Fe}(X)$ 为铁心损耗功率; $P_{Cu}(X)$ 为线圈电阻损耗功率。

5) 电磁系统的动作时间最短。在某些使用场合,为满足特殊需要,往往要求电器(特别是继电器)的动作时间短。此时,可以建立下列目标函数

$$t(X)=t_c(X)+t_d(X) \quad (4.6-179)$$

式中: $t_c(X)$ 为电磁系统的触动时间; $t_d(X)$ 为电磁系统的运动时间。

6) 某一位置的动能最小。电磁系统的动铁心(或衔铁)所储存的动能越大,触头或铁心闭合时的碰撞能量也就越大,这就容易引起触头或铁心的弹跳,使得电器产品的机械寿命和电寿命降低,改善上述情况的一条很重要的措施是保证动铁心(或衔铁)在触头闭合或铁心闭合时的动能最小,为此可以建立下列目标函数

$$E(X)=\frac{1}{2}m(X)v^2(X) \quad (4.6-180)$$

式中: $m(X)$ 为动铁心(或衔铁)质量; $v(X)$ 为触头或铁心闭合时动铁心(或衔铁)的运动速度。

7) 最佳的综合经济技术指标。从设计者的角度讲,常常希望得到多个经济技术指标均最佳的电磁系统。例如,要求电磁系统的体积最小、质量最轻、材料成本和损耗功率最小等。实际上,这属于多目标优化设计问题。此类问题需要采用多目标优化方法求解。

上述列举了一些电磁系统优化设计中常用的目标函数。根据实际需要,还可以建立其他形式的目标函数。

(2) 约束条件。约束条件是设计方案所应满足的技术条件。不同使用场合的电磁系统所需满足的技术条件不同,因此,电磁系统优化设计数学模型中的约束条件也不同。一个设计问题的目标函数,可能是另一个设计问题的约束条件。然而,对于单目标函数的优化设计问题,同一设计问题数学模型中的目标函数和约束条件不可能是同一参数。下面介绍几种常见的约束条件。

1) 静态吸力约束。一个电磁系统的最基本工作任务是驱动负载而达到做功的目的,这就要求电磁系统所产生的电磁吸力足以克服反力,从而使得电磁系统能够正常工作。因此,传统设计中,要求电磁系统在工作气隙为 δ 时的电磁吸力大于相应的反力,即

$$F_{xi}(X)-K_{fi}F_{fi}(X)\geqslant 0 \quad (i=1,2,\cdots,m) \quad (4.6-181)$$

式中: $F_{xi}(X)$ 为工作气隙为 δ_i 时的电磁吸力; $F_{fi}(X)$ 为工作气隙为 δ_i 时的反力; K_{fi} 为吸力裕度系数, $K_{fi}>1$ 。

在可靠性优化设计中,其吸力约束为

$$F_{xi}(X)|_{U=U_R}-F_{fi}(X)\geqslant 0 \quad (i=1,2,\cdots,m) \quad (4.6-182)$$

2) 励磁线圈稳态温升约束。该约束与式(4.6-173)相同。

3) 磁感应强度约束。该约束与式(4.6-174)相同。

4) 动作时间约束。一些电器特别是小型继电器中的电磁系统,常常要求其动作时间 $T(X)$ 不超过最大允许动作时间 T_m ,即

$$T(X)\leqslant T_m \quad (4.6-183)$$

5) 铁心或触头碰撞速度约束。铁心或触头的碰撞速度

越大,其碰撞时的能量就越大,从而也越容易引起铁心或触头弹跳,从而降低电器的使用寿命。为了减轻铁心或触头弹跳,要求电磁系统铁心或触头的碰撞速度 $v(X)$ 不大于允许值 v_m ,即

$$v(X)\leqslant v_m \quad (4.6-184)$$

6) 铁心运动速度约束。对于交流电磁系统,因电磁系统的动态特性与合闸相角有关,不同合闸相角下的运动速度特性不同,但要求在所有相角下合闸时其在整个运动过程中均不应出现停滞现象,即

$$v(X)|_{U=U_R}\geqslant 0 \quad (4.6-185)$$

以上介绍的是一般电磁系统设计中常见的技术要求(约束条件),对于某些特殊类型的电磁系统,可以根据其他技术要求,列出设计过程中设计变量所应满足的条件。

建立数学模型时,目标函数若选式(4.6-175)~式(4.6-180)中之一,则为单目标优化设计问题,也可选其中几个,则为多目标优化设计问题;有些约束条件是必选的。所以,电器电磁系统的可靠性优化设计是单目标或多目标有约束的非线性规划问题。

6.2.2 直流电磁系统可靠性优化设计

直流电磁系统多为拍合式和螺管式结构,下面介绍这两种结构形式的电磁系统可靠性优化设计。

6.2.2.1 直流拍合式电磁系统可靠性优化设计

直流拍合式电磁系统是最常用的一种电磁系统,它是大多数接触器和继电器的感测机构,图 4.6-32 是其典型的结构简图,其反力特性一般如图 4.6-33 所示。在进行电磁系统可靠性优化设计时,一般给定的原始数据是线圈额定电压值 U_e 、线圈允许温升 τ_m 及反力特性或给定气隙处的反力。

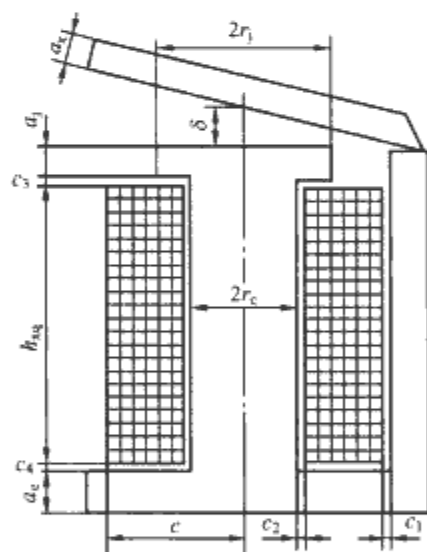


图 4.6-32 拍合式电磁系统结构简图

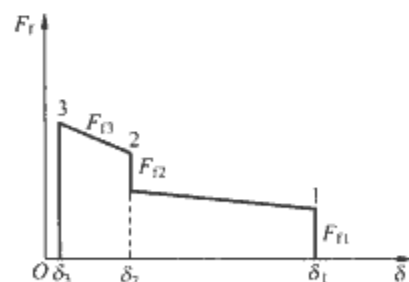


图 4.6-33 拍合式电磁系统反力特性

(1) 数学模型的建立。

1) 设计变量。电器电磁系统工程优化问题中,一般从其几何尺寸和激磁线圈的有关参数中选择关键参数作为设计变量。当这几个关键参数选定后,其他参数均可用这几个参数来表示。直流拍合式电磁系统的关键参数可选为铁心半径 r_e 、线圈高度 h_{sq} 、线圈外半径 c 、极靴半径 r_j ,则其他尺寸

可按如下确定。

极靴厚度

$$a_j = \frac{r_c}{2} \left[1 - \left(\frac{r_c}{r_j} \right)^2 \right]$$

磁轭与衔铁的宽度

$$b_x = b_e = 2c$$

衔铁厚度

$$a_x = \frac{\pi(0.5 \sim 0.8)r_c^2}{b_x}$$

因存在漏磁,铁心端部磁通比铁心中磁通要小,故计算公式中乘了系数(0.5~0.8)。当铁心较高,漏磁较严重时取小值。

轭铁厚度

$$a_e = \frac{\pi(1.5 \sim 2)r_c^2}{b_e}$$

由于结构原因或为了增加机械强度,并考虑到电磁系统底部磁通最大,故其截面取得比铁心大。

线圈匝数

$$N = \frac{k_{tc} h_{xq} (c - r_c - c_2)}{A_d} = \frac{4k_{tc} h_{xq} (c - r_c - c_2)}{\pi d^2}$$

式中: d 为导线线径; k_{tc} 为线圈的填充系数。

2) 目标函数。目标函数可取吸合可靠度最大或满足一定吸合可靠度要求时其他指标最优。此处介绍后一种情况。可取体积、质量、成本为目标,而质量、成本均以铁和铜的体积为基础进行计算。铁和铜的体积可表示为设计变量的函数。

铁和铜的体积与设计变量的关系为

$$V_{Fe} = a_x b(a_e + c_1 + 2c) + \pi[r_j^2 a_j + r_c^2 (h_{xq} + c_3 + c_4)] + a_e b(2c + a_e + c_1 + c_4 + h_{xq} + c_3 + a_j) \quad (4.6-186)$$

$$V_{Cu} = \pi k_{tc} [c^2 - (r_c + c_2)^2] h_{xq} \quad (4.6-187)$$

可按式(4.6-175)~式(4.6-177)得到电磁系统材料体积、质量、成本的表达式,这三个目标函数均为设计变量的函数,其中不包含可靠度因素。在设计时,可取其中之一作为目标函数。

3) 约束条件。温升和磁感应强度约束如式(4.6-173)、式(4.6-174)所示,吸力约束如式(4.6-182)所示。

吸力的计算应在可靠吸合电压下进行,而温升和磁感应强度的计算均须在最高工作电压下进行。吸力、温升、磁感应强度的求解均涉及电磁系统的计算,电磁系统的计算方法有磁路和磁场两种。磁路法较简单,并通过一些简化计算得到各量的近似计算公式,可使优化问题大大简化。

除性能约束外,设计变量还应满足一些几何尺寸约束,如各几何尺寸应大于零,并应满足

$$c + c_1 > r_j > r_c \quad (4.6-188)$$

$$c > r_c + c_2 \quad (4.6-189)$$

4) 数学模型。即

$$\begin{cases} \min\{V(X), m(X), C(X)\} \\ \text{s. t. } F_{xi} |_{U=U_R} \geq F_{fi} \quad (i=1,2,\dots,m) \\ \tau_m - \tau |_{U=K_u U_e} \geq 0 \\ B_m - B |_{U=K_u U_e} \geq 0 \\ \text{几何尺寸约束} \end{cases} \quad (4.6-190)$$

(2) 优化求解。选择合适的优化方法,求解拍合式电磁系统可靠性优化设计数学模型。

6.2.2.2 直流螺管式电磁系统可靠性优化设计

直流螺管式电磁系统结构简图如图4.6-34所示。

(1) 选择设计变量。设计变量选为:铁心半径 r_c 、线圈外半径 c 、挡铁高度 η 、线圈长度 h_{xq} 、导线线径 d 。

(2) 约束条件。约束条件与直流拍合式电磁系统静态可靠性优化设计相同,也为设计点处或关键点处吸力约束[同式(4.6-182)]、温升约束[同式(4.6-174)]、磁感应强度约束[同式(4.6-175)]。除性能约束外,设计变量还应满足一些几何尺寸约束,如各几何尺寸应大于零及相互间的一些关系。

吸力的计算应在可靠吸合电压下进行,而温升和磁感应强度的计算均须在最高工作电压下进行。螺管式电磁系统的吸力、温升、磁感应强度的求解也均涉及其电磁系统的计算。

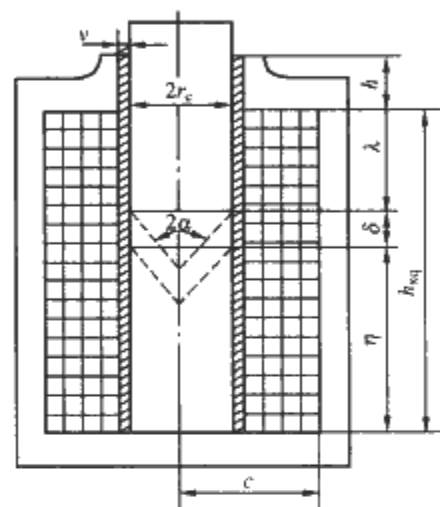


图 4.6-34 直流螺管式电磁系统结构简图

(3) 目标函数。电磁系统的有效材料体积 V 、质量 m 和价格 C 可作为优化目标。设电磁系统上下底的厚度为 $r_c/2$,铁心与外壳(铁轭)截面积相等,则

$$V = \pi(c^2 + r_c^2)(h_{xq} + r_c) \quad (4.6-191)$$

$$m_{Cu} = k_{tc} \pi(c^2 - r_c^2) h_{xq} \rho_{Cu} \quad (4.6-192)$$

$$m_{Fe} = \rho_{Fe} \pi[r_c^2 (2h_{xq} + r_c) + c^2 r_c] \quad (4.6-193)$$

$$m = m_{Cu} + m_{Fe} \quad (4.6-194)$$

$$C = \sigma_{Cu} m_{Cu} + \sigma_{Fe} m_{Fe} \quad (4.6-195)$$

数学模型表达式与式(4.6-190)相同。

到此为止,数学模型即已建立,可选择优化算法进行优化。

6.2.2.3 直流电磁系统动态可靠性优化设计

如果数学模型中包含有电磁系统的动态特性,则此类设计便属于动态指标下的电磁系统可靠性优化设计。对于直流电磁系统动态可靠性优化设计,设计变量的选取与静态可靠性优化设计时相同。目标函数一般选取为:

选电磁系统的经济指标——体积、质量、成本其中之一,例如选成本。

动静触头碰撞速度 v_1 要求最小。

动静铁心碰撞速度 v_2 要求最小。

约束条件一般选为:温升约束、磁感应强度约束、运动时间约束、速度约束。

所以数学模型为

$$\begin{cases} \min C(X) \\ \min v_1(X) \\ \min v_2(X) \\ \text{s. t. } g_1(X) = \tau - \tau_m \leq 0 \\ g_2(X) = B - B_m \leq 0 \\ g_3(X) = T - T_m \leq 0 \\ g_4(X) = -v \leq 0 \end{cases} \quad (4.6-196)$$

当然,有特殊要求时,其目标函数和约束条件可有所不同。

数学模型中 C , τ , B 的计算同静态可靠性优化设计,而其他量的计算需要进行动态过程计算,从动态特性中吸力及 $i(t)$, $v(t)$, $x(t)$ 等函数计算得到。动态过程的计算方法可参见有关篇章。

6.2.3 交流电磁系统可靠性优化设计

交流电磁系统的铁心需要用硅钢片叠制而成,故多采用 U 型、双 U 型、E 型、双 E 型等结构类型。下面以双 E 型交流电磁系统(见图 4.6-35)为例,介绍其可靠性优化设计数学模型的建立方法。

6.2.3.1 交流电磁系统静态可靠性优化设计

6.2.3.1.1 设计变量的选择

根据图 4.6-35,可以选取下列参数作为优化设计的设计变量: b_z , a , b_{xq} , h_{xq} , m , n , b , c , γ_2 , d 。其中, γ_2 为分磁环内磁极截面面积与磁极截面总面积之比; d 为励磁线圈导线线径。

在优化设计过程中,大多采用相对设计变量,令 $x_1 = b_z/\delta_0$, $x_2 = a/b_z$, $x_3 = b_{xq}/b_z$, $x_4 = h_{xq}/b_z$, $x_5 = m/b_z$, $x_6 = n/b_z$, $x_7 = b/b_z$, $x_8 = c/b_z$, $x_9 = \gamma_2$, $x_{10} = d$ 。其中, δ_0 为动铁心处于打开位置时的气隙长度。

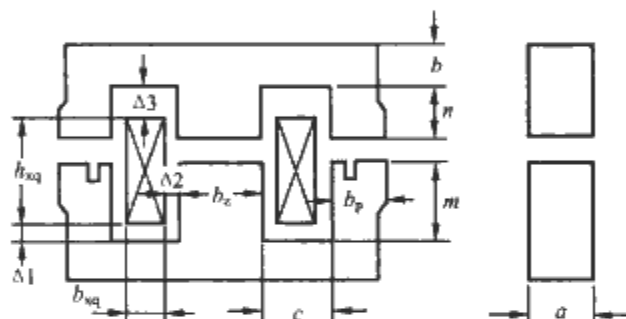


图 4.6-35 双 E 型交流电磁系统示意图

6.2.3.1.2 目标函数

优化目标选取时,在保证电磁系统可靠吸合与释放的前提下应力求节能、节材,一般以材料费用、线圈额定热态下消耗功率、体积或质量来衡量节能、节材效果。所以优化时目标函数可从这几个量中选取。

由图 4.6-35 可得电磁系统铁磁材料和线圈的体积为

$$V_{Fe} = a(b_z + 2b_p)(m + n) + 2ab(2b_p + 2c + b_z) \quad (4.6-197)$$

$$V_{Cu} = [2(a + b_z + 2\Delta_2)b_{xq} + \pi b_{xq}^2]h_{xq} \quad (4.6-198)$$

$$\text{则体积为} \quad V = V_{Cu} + V_{Fe} \quad (4.6-199)$$

$$\text{质量为} \quad m = m_{Cu} + m_{Fe} = k_{Fe}\rho_{Fe}V_{Fe} + \rho_{Cu}V_{Cu} \quad (4.6-200)$$

式中: ρ_{Fe} 为铁磁材料密度; ρ_{Cu} 为线圈铜导线密度; k_{Fe} 为铁心的叠片系数。

材料成本

$$C = C_{Cu} + C_{Fe} = \sigma_{Fe}m_{Fe} + \sigma_{Cu}m_{Cu} \quad (4.6-201)$$

式中: C_{Fe} 为铁磁材料成本; C_{Cu} 为线圈铜导线成本; σ_{Fe} 为单位质量铁磁材料成本; σ_{Cu} 为单位质量线圈铜导线成本。

6.2.3.1.3 约束条件

约束条件与直流电磁系统静态可靠性优化设计相同,也为设计点处或关键点处吸力约束[同式(4.6-182)]、温升约束[同式(4.6-173)]、磁感应强度约束[同式(4.6-174)]。除性能约束外,设计变量还应满足一些几何尺寸约束,如各几何尺寸应大于零及相互间的一些关系。

当设计变量、目标函数、约束条件选定后,其数学模型确定,选择一种约束非线性优化算法进行优化计算即可。优

化计算过程中需计算电磁系统的静态特性,其他篇章有介绍,此处就不重复了。

6.2.3.2 交流电磁系统动态可靠性优化设计

下面仍以双 E 型交流电磁系统为例,介绍其数学模型的建立方法。

6.2.3.2.1 设计变量的选择

设计变量的选择与静态可靠性优化设计时相同。

6.2.3.2.2 目标函数

电器电磁系统动态可靠性优化设计时,优化目标的选取也应考虑到在保证电磁系统可靠吸合与释放的前提下应力求节能、节材,所以同静态可靠性优化设计时一样,优化目标一般选取材料费用、线圈额定热态下消耗功率、体积或质量等。下面以选取材料费用为目标函数为例进行介绍。

对于电器电磁系统动态可靠性优化设计,优化目标除考虑静态指标外,还应考虑动态指标。触头碰撞速度 v_1 和铁心碰撞速度 v_2 是影响交流电磁系统工作可靠性和工作性能的两个重要指标。若触头碰撞速度 v_1 和铁心碰撞速度 v_2 较大,则撞击能量增大,这一方面会影响电磁系统的机械寿命,另一方面会使触头的弹跳加剧而造成触头磨损增加,并降低触头的电寿命,从而使电器的性能指标降低。触头的弹跳可能会使主回路电路时通时断,甚至会造成触头粘接,使电器产品工作可靠性降低。

对于交流电磁系统,当合闸相角不同时,动态过程是不同的。故触头碰撞速度 v_1 和铁心碰撞速度 v_2 也随合闸相角的不同而异。所以要比较两个电磁系统的性能好坏,必须看各个合闸相角时的情况,可用所有合闸相角下触头闭合时运动速度的平均值 v_{1pj} 及所有合闸相角下动铁心运动速度的平均值 v_{2pj} 来衡量。由于线圈接通电源时,合闸相角是随机的,可以认为在各相角合闸的几率是相等的,因而,可求出平均碰撞速度

$$v_{1pj} = \frac{1}{180} \int_0^{180} v_1 d\theta \quad (4.6-202)$$

$$v_{2pj} = \frac{1}{180} \int_0^{180} v_2 d\theta \quad (4.6-203)$$

所以交流电磁系统动态可靠性优化设计时也将 v_{1pj} 及 v_{2pj} 作为目标函数,故此问题为多目标优化问题。

对于多目标优化问题,由于各分目标间会相互矛盾,某个分目标的极小化会引起其他分目标的最优值变坏。对于多目标优化设计的决策问题,通常有下列几种决策方法:

(1) 统一目标法。给各分目标指定权数,把它们组合成单目标函数,按参数变动这些权数时,便生成非劣解集。

(2) 协调曲线法。当分目标最优值间出现矛盾时,为了使得某个相对较大值(以极小值为最优而言)的分目标也达到合理的值,需要以增大其他几个分目标为代价,在分目标函数优化值之间进行协调,相互作用些让步,以便最终得到一个从总体上满意的方案。

(3) 主要目标法。首先对各分目标在设计中的重要程度进行排队,重要的排在前列。然后依次求各分目标函数的约束最优值。求解时,将另外几个目标函数根据决策者初步设计的考虑,给予适当的最优值的估计值,作为辅助约束处理。最后,求得整个设计可以接受的相对最优解或满意解。

(4) 对策论方法(game-theoretic approach)。将各分目标作为一个局中人(player),即每个局中人与一个要被优化的分目标函数相对应。局中人总想在谈判中选择互利策略(折中解),即它们都与最坏支付(pay off)(目标函数值)的距离最远。

下面介绍加权因子法和对策论方法形成新目标函数的方法,具体如下:

(1) 加权因子法。根据各分目标各自的重要程度的不同,以及它们的数量级和量纲的不同,引入不同的权因子,可得新目标函数如下

$$\min f(X) = \alpha_1(m_1 + m_2 + \alpha_0 m_3) + \alpha_2 v_{1pj} + \alpha_3 v_{2pj} \quad (4.6-204)$$

式中: m_1 为动铁心质量; m_2 为静铁心质量; m_3 为线圈用铜质量; v_{1pj} 为动、静触头碰撞时动触头平均运动速度; v_{2pj} 为动、静铁心碰撞时动铁心平均运动速度; α_0 为铜、铁价格比; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 分别为加权系数,以使各分目标均得以优化。

(2) 对策论方法。首先将各分目标作为单目标进行优化,得到各极值点及其相应的分目标函数值,如表 4.6-15 所示。

表 4.6-15 各极值点处各分目标的函数值

极值点	f_c	$f_{v_{1pj}}$	$f_{v_{2pj}}$
X_c	$f_c(X_c)$	$f_{v_{1pj}}(X_c)$	$f_{v_{2pj}}(X_c)$
$X_{v_{1pj}}$	$f_c(X_{v_{1pj}})$	$f_{v_{1pj}}(X_{v_{1pj}})$	$f_{v_{2pj}}(X_{v_{1pj}})$
$X_{v_{2pj}}$	$f_c(X_{v_{2pj}})$	$f_{v_{1pj}}(X_{v_{2pj}})$	$f_{v_{2pj}}(X_{v_{2pj}})$

表 4.6-15 中, $f_c, f_{v_{1pj}}, f_{v_{2pj}}$ 分别为价格、触头碰撞速度均值、铁心碰撞速度均值目标函数值; $X_c, X_{v_{1pj}}, X_{v_{2pj}}$ 分别为以价格、触头碰撞速度均值、铁心碰撞速度均值为单目标函数时优化所得的极值点。

设 f_{cw} 为 $f_c(X_c), f_c(X_{v_{1pj}}), f_c(X_{v_{2pj}})$ 中最大值; $f_{v_{1pj}w}$ 为 $f_{v_{1pj}}(X_c), f_{v_{1pj}}(X_{v_{1pj}}), f_{v_{1pj}}(X_{v_{2pj}})$ 中最大值; $f_{v_{2pj}w}$ 为 $f_{v_{2pj}}(X_c), f_{v_{2pj}}(X_{v_{1pj}}), f_{v_{2pj}}(X_{v_{2pj}})$ 中最大值。

根据 Game 理论,新目标函数为

$$\max f(X) = (f_{cw} - f_c)^{w_1} (f_{v_{1pj}w} - f_{v_{1pj}})^{w_2} (f_{v_{2pj}w} - f_{v_{2pj}})^{w_3} \quad (4.6-205)$$

式中: w_1, w_2, w_3 分别为各分目标函数的相对重要度。

式 (4.6-205) 为目标函数的最大化问题,将目标函数值乘以 -1,即可转换为最小化问题。

6.2.3.2.3 约束条件

交流电磁系统的吸力特性和运动特性不仅与时间有关,而且与电源电压合闸相角有关。显然,动态特性特别是动态吸力特性与反力特性配合的情况很复杂,但对配合的要求却很明确。当线圈突然加上 (85%~110%) U_e 时,电器应在任一合闸相角下均能可靠地吸合,即其动铁心应顺利地吸到底,并保持闭合状态,直到电源切除或电压降到释放值时,才允许动铁心释放。由动态特性分析可知,若吸合过程中速度大于零,则表明动铁心吸合过程中不会出现中途迟滞或卡住现象。更确切地讲,若吸合过程中无明显的速度小于零的现象,则表明动铁心吸合过程中不会出现中途迟滞或卡住现象。

所谓无明显的速度小于零的现象,是指对于交流电磁系统,总存在在某些合闸相角下,在衔铁吸合运动阶段会出现可动部分触动后,由于吸力上升速度慢,很快会出现吸力小于反力,原积蓄动能不足,致使速度小于零。但是,出现这种现象的时间短暂,并不会导致电磁系统不触动,或运动不顺利。也就是说,可动部分的衔铁最后仍能在一定的时间内可靠地顺利地吸合到底。

所以,速度特性是合闸过程中必要的约束条件。因而约束条件如下:

(1) 电磁系统在任何相角下在动断辅助触头打开后动铁心运动速度应大于零。

(2) 闭合位置最小吸力应大于反力。

(3) 线圈的最高工作温升应不超过允许温升。

(4) 要求电磁系统的吸合时间小于规定时间。

(5) 优化变量几何尺寸约束。

6.2.3.2.4 不同新目标函数时交流电磁系统可靠性优化设计数学模型

由于新目标函数形成的不同,交流电磁系统可靠性优化设计数学模型也不相同。

(1) 以式 (4.6-204) 为目标的交流电磁系统可靠性优化设计数学模型如式 (4.6-206) 所示

$$\begin{cases} \min f(X) = \alpha_1(m_1 + m_2 + \alpha_0 m_3) + \alpha_2 v_{1pj} + \alpha_3 v_{2pj} \\ \text{s. t. } v \begin{cases} x > x_1 \\ U = U_R \end{cases} \geq 0 \\ F_{\min} \begin{cases} \delta = \delta_{\min} \\ U = U_R \end{cases} \geq F_f \\ \tau_{\max} \begin{cases} \delta = \delta_{\min} \\ U = 1.1U_e \end{cases} \leq \tau_m \\ t_{cd} \leq t_{cdm} \\ X_{i\min} \leq X_i \leq X_{i\max} \\ \text{其他几何尺寸约束} \end{cases} \quad (4.6-206)$$

式中: x 为位移; x_1 为动断辅助触头超程; τ_m 为最高允许温升; t_{cdm} 为最大允许吸合时间; F_f 为闭合位置反力; F_{\min} 为闭合位置的最小吸力; $X_i, X_{i\min}, X_{i\max}$ 为第 i 个设计变量及其可取的最小值和最大值。

关于约束条件的处理,应根据具体问题具体分析。例如,对于第一个约束条件和变量的几何尺寸约束条件,则是必须满足的,如不满足,则有可能导致计算程序出错。故对于不满足这种约束的设计点,应自动拒绝接受。但这样做限制了探索整个设计空间的能力,从而有可能使搜索陷于局部极值点。所以对于不满足其他性能约束条件的设计点,不应自动拒绝接受,而应对这类约束条件进行转化,将其作为目标函数的一部分。故式 (4.6-206) 可转化为

$$\begin{cases} \min f(X) \{1 + R_1 \varphi[F(X)] + R_2 \varphi[\tau(X)] + R_3 \varphi[t(X)]\} \\ \text{s. t. } v \begin{cases} x > x_1 \\ U = U_R \end{cases} \geq 0 \\ X_{i\min} \leq X_i \leq X_{i\max} \\ \text{其他几何尺寸约束} \end{cases} \quad (4.6-207)$$

式中: R_1, R_2, R_3 分别为各罚函数的罚因子。

各罚函数如下

$$\varphi[F(X)] = \begin{cases} 0 & (F_{\min} \begin{cases} \delta = \delta_{\min} \\ U = U_R \end{cases} > F_f) \\ F_f - F_{\min} \begin{cases} \delta = \delta_{\min} \\ U = U_R \end{cases} & (F_{\min} \begin{cases} \delta = \delta_{\min} \\ U = U_R \end{cases} \leq F_f) \end{cases} \quad (4.6-208)$$

$$\varphi[\tau(X)] = \begin{cases} 0 & (\tau_{\max} \begin{cases} \delta = \delta_{\min} \\ U = 1.1U_e \end{cases} \leq \tau_m) \\ \tau_{\max} \begin{cases} \delta = \delta_{\min} \\ U = 1.1U_e \end{cases} - \tau_m & (\tau_{\max} \begin{cases} \delta = \delta_{\min} \\ U = 1.1U_e \end{cases} > \tau_m) \end{cases} \quad (4.6-209)$$

$$\varphi[t(X)] = \begin{cases} 0 & (t_{cd} \leq t_{cdm}) \\ t_{cd} - t_{cdm} & (t_{cd} > t_{cdm}) \end{cases} \quad (4.6-210)$$

(2) 以式 (4.6-205) 为目标的交流电磁系统可靠性优化设计数学模型如式 (4.6-211) 所示

$$\begin{cases} \min -f(X) \{1 + R_1 \varphi[F(X)] + R_2 \varphi[\tau(X)] + R_3 \varphi[t(X)]\} \\ \text{s. t. } v \left| \begin{array}{l} x > x_r \\ U = U_R \end{array} \right. \geq 0 \\ X_{\min} \leq X_i \leq X_{\max} \\ f(X) \text{ 中各相乘的因子均应大于零} \\ \text{其他几何尺寸约束} \end{cases} \quad (4.6-211)$$

6.2.4 电器电磁系统模糊可靠性优化设计

以概率论和数理统计为数学基础的可靠性设计,一般称为常规可靠性设计。它考虑的是电器电磁系统设计中存在随机现象,然而电器电磁系统设计中不仅存在随机现象,还存在大量的模糊现象。常规可靠性设计理论对处理模糊现象无能为力,这就迫使人们探讨将模糊数学应用于常规可靠性设计理论中的方法。这种模糊数学与常规可靠性设计理论相互结合的方法称为模糊可靠性设计方法。模糊可靠性设计方法的出现使得可靠性设计方法既可处理随机现象,又可处理模糊现象。

模糊数学把数学的应用范围从精确现象(非此即彼)扩大到模糊现象(亦此亦彼)的范畴。模糊随机可靠性设计(简称模糊可靠性设计)是以模糊数学、常规可靠性设计理论(概率论和数理统计)为基础,同时考虑模糊现象和随机现象而采用的设计理论和方法。

6.2.4.1 电器电磁系统模糊可靠性设计

6.2.4.1.1 模糊可靠性设计准则

常规可靠性设计将电磁系统合格记为 $A = \{U_x \leq U_{xy}\}$, 而电磁系统所处的状态记为 Ω , 所以其设计准则可用特征函数 $C_A(\Omega)$ 表示为

$$C_A(\Omega) = \begin{cases} 1 & (\Omega \in A) \\ 0 & (\Omega \notin A) \end{cases} \quad (4.6-212)$$

考虑到电磁系统由合格到不合格间有一个过渡过程,即存在模糊性,所以将电磁系统合格这一模糊事件记为 \tilde{A} , 一般可用模糊事件的隶属函数 $\mu_{\tilde{A}}(u)$ 来描述其合格程度,则这一模糊事件可记为 $\tilde{A} = \{U_x \leq U_{xy}\}$, 其隶属函数可记为 $\mu_{\tilde{A}}(U_x \leq U_{xy})$ 。若 $U_x = 187\text{V}$, $U_{xy} = 187\text{V}$, 则电磁系统合格,即 $\mu_{\tilde{A}}(187, 187) = 1$; 若 $U_x = 187.1\text{V}$, $U_{xy} = 187\text{V}$, 则电磁系统处于介于合格与不合格之间的模糊状态,其处于合格模糊状态的隶属度 $\mu_{\tilde{A}}(187, 187)$ 应在 $0 \sim 1$ 之间取值。根据具体情况可建立模糊事件 $\tilde{A} = \{U_x \leq U_{xy}\}$ 的隶属函数。称设计准则 $U_x \leq U_{xy}$ 为电磁系统的模糊设计准则(式中“ \leq ”的含义为近似小于或等于)。

采用模糊的设计准则,设计时要考虑合格、不合格和中间过渡状态,比只考虑合格与不合格更客观、更符合工程实际。

6.2.4.1.2 模糊可靠性设计基本原理

对于模糊可靠性设计,其可靠度是指模糊事件 \tilde{A} 的概率,设应力和强度分别为 Y 和 X , 则产品合格这一模糊事件记为 $\tilde{A} = \{y \leq x\}$ 。即

$$R = P(Y \leq X) \quad (4.6-213)$$

其可靠度的计算可用概率密度函数联合积分法。设强度

X 的概率密度函数为 $f(x)$, 应力 Y 的概率密度函数为 $g(y)$, 则其应力—强度干涉模型如图 4.6-36 (a) 所示, 其中 x_0 为某一强度值。图 4.6-36 (b) 为 $y \leq x$ 的隶属函数, 它描述了失效发生的中间过渡状态。

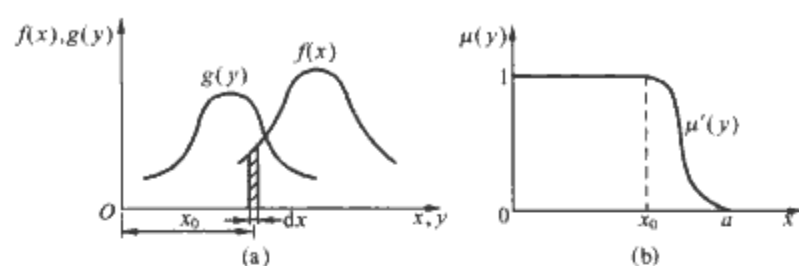


图 4.6-36 模糊应力—强度干涉模型

(a) 基本干涉图; (b) 隶属函数

在图 4.6-36 中,按常规可靠性理论可得

$$P(y \leq x_0) = \int_{-\infty}^{x_0} g(y) dy = \int_{-\infty}^{+\infty} g(y) C_A(y) dy$$

式中: $C_A(y)$ 为普通事件 $A = \{y \leq x_0\}$ 的特征函数。

推广上式,可得 $y \leq x_0$ 的概率为

$$P(y \leq x_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(y) \mu(y) dy \quad (4.6-214)$$

式中: $\mu(y)$ 为模糊事件 $\tilde{A} = \{y \leq x_0\}$ 的隶属函数。

$$\mu(y) = \begin{cases} 1 & (y \leq x_0) \\ \mu'(y) & (x_0 \leq y < a) \\ 0 & (y \geq a) \end{cases} \quad (4.6-215)$$

式中, $\mu'(y)$ 用来描述模糊性。

若 $a = x_0$, 则不考虑模糊性的可靠性设计。

强度 x 落在区间 $(x_0 - dx/2, x_0 + dx/2)$ 内的概率为

$$P(x_0 - \frac{dx}{2} \leq x_0 \leq x_0 + \frac{dx}{2}) = f(x_0) dx$$

假设 $(y \leq x)$ 与 $(x_0 - \frac{dx}{2} \leq x_0 \leq x_0 + \frac{dx}{2})$ 为两个独立的事件,则由概率乘法定理知,强度 x 在区间 $(x_0 - dx/2, x_0 + dx/2)$ 内时,零件的可靠度为

$$dR = f(x_0) dx \int_{-\infty}^{+\infty} g(y) \mu(y) dy$$

考虑到强度的所有可能取值范围,因此产品的可靠度为

$$\begin{aligned} R &= \int_{-\infty}^{+\infty} dR = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) [\int_{-\infty}^{+\infty} g(y) \mu(y) dy] dx \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \int_{-\infty}^{x_0} g(y) dy + \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) [\int_{x_0}^a g(y) \mu'(y) dy] dx \end{aligned} \quad (4.6-216)$$

式 (4.6-216) 中的前一项为常规可靠性设计计算可靠度的公式,后一项为考虑模糊性时所增加的部分。

6.2.4.2 电器电磁系统模糊吸合可靠度的计算公式

对于某型号电器产品中的电磁系统,其吸合电压值 U_x 为随机变量,其密度函数用 $g(U_x)$ 表示,吸合电压允许值为一定值 U_{xy} , 则吸合电压值近似小于或等于吸合电压允许值作为一个模糊事件,即模糊事件 $\tilde{A} = \{U_x \leq U_{xy}\}$, 用 $\mu(U_x)$ 表示此模糊事件的隶属函数,则电磁系统的吸合可靠度为

$$\begin{aligned} R &= P(U_x \leq U_{xy}) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(U_x) \mu(U_x) dU_x \\ &= \int_{-\infty}^{a_1} g(U_x) dU_x + \int_{a_1}^{a_2} g(U_x) \mu'(U_x) dU_x \end{aligned} \quad (4.6-217)$$

$$\mu(U_x) = \begin{cases} 1 & (U_x \leq a_1) \\ \mu'(U_x) & (a_1 < U_x < a_2) \\ 0 & (U_x \geq a_2) \end{cases}$$

式中

其隶属函数的确定可根据积累的数据、已有经验及主观判断来确定,具有一定的灵活性。 a_1 和 a_2 是为了描述模糊事件而确定的中间过渡过程中应力所能取的上下限量。 a_1 一般可取所给吸合电压数值 U_{xy} , a_2 可根据经验由增广系数法加以确定。机械模糊可靠性设计中通常取 $a_2 = k a_1$, k 为 $1.05 \sim 1.3$ 。对于电磁系统,可取 k 为 $1.0 \sim 1.06$ 。当 $k=1$ 时,即为不考虑模糊性时的可靠性设计;当 $k=1.06$ 时,对于 $U_c=220V$, $kU_{xy}=0.85kU_c=198.22V$,一般电网电压最低也在 $200V$ 左右,故选取此范围是合理的。

对于电磁系统模糊可靠性设计中的隶属函数,可采用线性的和正态形的,下面以正态形的为例讨论其可靠度的计算公式。

若隶属函数采用正态型,如图 4.6-37 所示,即

$$\mu(U_x) = \begin{cases} 1 & (U_x \leq U_{xy}) \\ \exp\left[-\frac{(U_x - U_{xy})^2}{b^2}\right] & (U_x > U_{xy}) \end{cases} \quad (4.6-218)$$

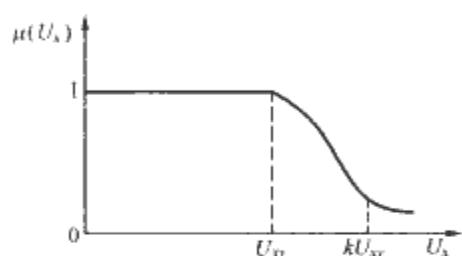


图 4.6-37 正态型隶属函数

当 $U_x \sim N(\bar{U}_x, \sigma^2)$ 时,可靠度的计算公式为

$$\begin{aligned} R &= P(U_x \leq U_{xy}) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} g(U_x) \mu(U_x) dU_x \\ &= \int_{-\infty}^{U_{xy}} g(U_x) dU_x + \int_{U_{xy}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(U_x - \bar{U}_x)^2}{2\sigma^2}\right] \\ &\quad \exp\left[-\frac{(U_x - U_{xy})^2}{b^2}\right] dU_x \\ &= \Phi\left(\frac{U_{xy} - \bar{U}_x}{\sigma}\right) + \frac{b}{\sqrt{2\sigma^2 + b^2}} \exp\left[-\frac{(U_{xy} - \bar{U}_x)^2}{(2\sigma^2 + b^2)}\right] \times \\ &\quad \Phi\left(-\frac{b}{\sqrt{2\sigma^2 + b^2}} \times \frac{U_{xy} - \bar{U}_x}{\sigma}\right) \end{aligned} \quad (4.6-219)$$

式 (4.6-219) 中涉及 b 值的选取问题。考虑到在线性隶属函数时, a_1 取为吸合电压允许值 U_{xy} , a_2 取 ka_1 , 那么

在正态隶属函数时, b 可按“ 3σ ”原则来确定,即 $b = \frac{a_2 - a_1}{3} = \frac{(k-1)a_1}{3}$ 。当 $k=1.05$ 时, $b = 0.017a_1 = 0.017U_{xy}$ 。

6.2.4.3 电器电磁系统模糊可靠性优化设计

电器电磁系统模糊可靠性优化设计的方法与一般可靠性优化设计的方法类似。首先需要建立模糊可靠性优化设计数学模型,然后选择优化算法,进行优化计算,得到最佳方案。这里与一般可靠性优化设计的不同之处是其数学模型,下面介绍其数学模型的建立方法。

(1) 以模糊吸合可靠度 R 为目标函数。以模糊吸合可靠度 R 为优化目标,需要解决以下几个问题:

1) 计算某设计方案吸合电压均值和标准差。当以模糊吸合可靠度 R 为目标函数时,在优化过程中,对每一组设计变量对应的设计方案均应计算其模糊吸合可靠度 R 。而模糊吸合可靠度 R 的计算首先需要计算出此设计方案的吸合电压均值和标准差。

2) 选择模糊隶属函数。模糊隶属函数的选择可根据实际情况和以往经验,可选择线性隶属函数或正态型隶属函数。不管选择哪种隶属函数,均需要确定 k 值。对于正态型隶属函数,确定 k 值后还需要计算 b 值, b 值确定后可按式 (4.6-218) 得到隶属函数表达式。

3) 计算其模糊吸合可靠度 R 。对于正态型隶属函数,模糊吸合可靠度 R 可按式 (4.6-219) 计算。

4) 约束条件。同电器电磁系统常规可靠性优化设计时的约束条件。

5) 选择优化算法。优化算法的选择与常规可靠性优化设计时相同,可选择全局优化算法,例如模拟退火法、遗传算法、Tabu 算法等。当选定优化算法后,即可进行优化计算。

(2) 以模糊吸合可靠度 R 为约束条件。以模糊吸合可靠度 R 为约束条件进行优化时,需要首先计算模糊可靠吸合电压值 U_R 。对于正态型隶属函数,此吸合电压值即为式 (4.6-219) 中的吸合电压均值。式 (4.6-219) 中标准差可用吸合电压均值与变异系数的乘积计算。吸合电压变异系数的选取可根据以往经验,或参考类似结构产品的吸合电压变异系数数据。

由式 (4.6-219) 可见,可靠度 R 与吸合电压均值 \bar{U}_x 间关系非常复杂,不可用解析法求得,可采用一维搜索法。因 R 与 \bar{U}_x 的关系为单调的减函数,即 \bar{U}_x 越大, R 越小,故可用对分法。

第 7 章 控制继电器的可靠性指标与考核方法

控制继电器是一种量大面广的基础电器元件，广泛用于机械、电子、航天航空、铁道、邮电、电力等各个部门。一个大型设备或系统中一般都使用了不少继电器，为了保证设备或系统具有较高的可靠性，作为设备或系统中主要基础元件之一的控制继电器必须有很高的可靠性，所以控制继电器的可靠性已受到国内外普遍重视，不少国家（如美国、日本等）均已制定了有可靠性指标的继电器标准。

1 可靠性指标

为了统一继电器的可靠性考核方法，进一步推动我国继电器可靠性工作的开展，根据国家技术监督局下达的国家标准制订计划，由原机械工业部北京电工综合技术经济研究所和河北工业大学负责，制定了 GB/T 15510—1995《控制用电磁继电器可靠性试验通则》。在这份国家标准中，规定控制继电器以其失效率高低来划分其可靠性等级，其失效率等级的名称、符号及每个等级的最大失效率如表 4.7-1 所示。

表 4.7-1 控制继电器失效率等级的名称、符号及最大失效率

失效率等级名称	失效率等级符号	最大失效率 λ_{\max} (1/10 次)
亚五级	Y	3×10^{-5}
五 级	W	1×10^{-5}
六 级	L	1×10^{-6}
七 级	Q	1×10^{-7}

由于采用失效率等级作为控制继电器的可靠性指标，所以其可靠性验证试验也称失效率试验。

2 试验要求

2.1 环境条件

(1) 一般情况下，试验应在 GB/T 2421—1999《电工电子产品环境试验第 1 部分：总则》规定的试验时的标准大气条件下进行。即温度为 15~35℃，相对湿度为 45%~75%，大气压力为 86~106kPa。

试验应在试验的标准大气条件中放置足够的时间（不少于 8h），以使试品达到热平衡。

(2) 试验环境应注意避免灰尘和其他污染。

2.2 安装条件

(1) 试品应安装在正常使用位置。

(2) 试品应安装在无显著冲击和振动的地方。

(3) 试品安装面与垂直面的倾斜度应符合产品标准的规定。

2.3 电源条件

(1) 交流电源应为频率等于 50Hz 的正弦波电源，其容许偏差为：

1) 波形畸变因数不大于 5%。

2) 频率偏差为 ±5%。

(2) 直流电源可采用发电机、蓄电池或稳压电源，若试验时不会影响产品性能，则可以采用三相全波整流电源，但其纹波分量应满足规定，即峰值与谷值之差和直流分量之比值不大于 6%。

(3) 试验过程中，当触点接通负载时，试验电源电压的波动相对于空载电压而言应不大于 5%。

2.4 负载条件

(1) 负载电源可为直流电源或交流电源，一般情况下，推荐采用直流电源。

(2) 负载可为阻性负载、感性负载、容性负载或非线性负载，一般情况下，推荐采用阻性负载（交流时 $\cos\varphi$ 为 0.9~1.0，直流时 $L/R \leq 1\text{ms}$ ）。

(3) 一般情况下，试验时触点电路电源电压 U_N 应采用 24V 或产品标准中规定的触点最低直流额定电压值。

(4) 一般情况下，试验时触点电路负载电流 I_C 的数值可采用额定电流或下列值：2 类触点（触点额定电压为 5~250V，触点额定电流为 0.1~1A 的触点）为 100mA；3 类触点（触点额定电压为 5~600V，触点额定电流为 0.1~100A 的触点）为 1A。

2.5 激励条件

(1) 试验时，试品应以输入激励量的额定值进行激励。

(2) 试验时试品每小时的循环次数应不低于产品标准中规定的额定值，为缩短试验时间，在不影响试品正常动作与释放的条件下，试品每小时的循环次数可以高于产品标准中规定的额定值，其数值可从 6，30，600，1200，1800，3600，7200，12 000，18 000，36 000 中选取。

(3) 负载比（负载因数）应从下列推荐数值，即 15%，25%，33%，40%，50%，60% 中选取。

3 试验方法

3.1 试品的准备

为满足产品寿命服从指数分布的假设，应采用筛选的方法来剔除早期失效的产品，所以试品应从稳定的工艺条件下批量生产并经过筛选的合格产品中随机抽取。为了避免试验过分复杂，推荐采用常温（15~35℃）下进行筛选。筛选条件应是运行次数为 5000 次；激励条件、触点电路电源电压 U_N 及触点电路负载电流与前面试验要求所述的相同。

3.2 试品的检测

3.2.1 试验前检测

试验前先对试品进行开箱检测，检查试品的零部件有无运输引起的损坏、断裂，剔除零部件损坏的试品，并按规定补足试品数。剔除掉的试品不计入相关失效数 r 内。

3.2.2 试验过程中检测

一般情况下，在试品每次循环的“接通”期的 40% 时间内与“断开”期的 40% 时间内，应监测试品的所有触点，

监测闭合触点的接触压降及断开触点间的电压。试验过程中不允许对试品进行清理和调整。

3.2.3 试验后检测

一般情况下，试验后应对所有未失效试品的下列项目进行检查。

- (1) 外观检查。
- (2) 动作电压。
- (3) 释放电压。
- (4) 接触电阻。
- (5) 绝缘电阻。
- (6) 介质耐压。
- (7) 吸合时间。
- (8) 释放时间。
- (9) 回跳时间。
- (10) 线圈电阻。

3.3 失效判据

当出现下列任意一种情况时，即认为该试品失效。

- (1) 闭合触点的接触压降 U_j 超过下列极限值 U_{jm} 。

1) 负载电流为额定电流时, 接触压降的极限值 U_{jm} 为触点电路电源电压 U_N 的 5% 或 10%。

2) 负载电流为 100mA 或 1A 时, 触点接触压降的极限值 U_m 见表 4.7-2。

表 4.7-2 触点接触压降的极限值 U_{im}

触点电路负载电流 I_c (mA)	触点接触压降的极限值 U_{jm} (V)
100	0.5
1000	1.0

(2) 断开触点间的电压 U_c 低于极限值 U_{cx} ，一般情况下， U_{cx} 应为触点电路电源电压的 90%。

- (3) 触点发生熔接或其他形式的粘接。
- (4) 触点燃弧时间超过 0.1s。
- (5) 继电器线圈通电时不动作。
- (6) 继电器线圈断电时不返回。
- (7) 试品零部件有破坏性损坏, 连接导线及零部件松动。
- (8) 试品在试验后检测中, 任一项目的检测结果不符合标准的规定。

4 可靠性验证试验的抽样方案及试验程序

4.1 可靠性验证试验的抽样方案

继电器的可靠性验证试验（失效率试验）应在实验室进行，一般情况下，继电器的可靠性验证试验（失效率试验）推荐采用定时或定数截尾试验。

继电器的可靠性验证试验（失效率试验）分为定级试验、维持试验与升级试验。

定级试验是指为首次确定产品的失效率等级而进行的试验，或在某一失效率等级的维持试验或升级试验失败后，对产品重新确定其失效率等级而进行的试验。

维持试验是指为证明产品的失效率等级仍不低于定级试验或升级试验后所确定的失效率等级而进行的试验。

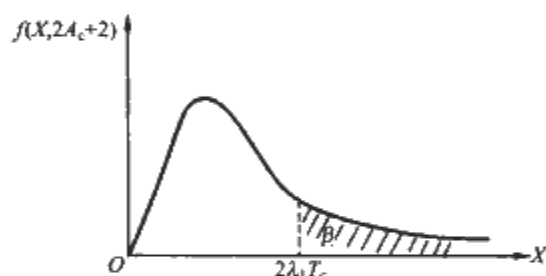
升级试验是指为证明产品的失效率等级比原定的失效率等级更高而进行的试验。

抽样方案的确定方法：推荐采用定时或定数截尾试验。

寿命服从单参数指数分布时,失效率验证试验方案中的截尾时间 T_c 为

$$T_c = \frac{\chi_{1-\beta}^2(2A_c + 2)}{2\lambda_1} \quad (4.7-1)$$

其中, $2\lambda_1 T_c$ 与 β 间的关系可用图 4.7-1 表示。

图 4.7-1 $2\lambda_1 T_c$ 与 β 间的关系

$2\lambda_1 T_c$ 就等于自由度为 $2A_c+2$ 的 χ^2 分布的 $1-\beta$ 下侧分位点 $\chi^2_{1-\beta}(2A_c+2)$ 。

对于不同的 A_c 值, 可求得相应的 T_c 值, 从而可得出表 4.7-3。定级试验和升级试验的置信度取为 0.9, 其抽样方案见表 4.7-3。维持试验的置信度取为 0.6, 其抽样方案见表 4.7-4。

表 4.7-3 定级试验和升级试验的抽样方案

截尾时间 T_e (10^6 次) 失效率等级		允许失效数 A_e									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
YW		0.768	1.30	1.77	2.23	2.66	3.09	3.51	3.92	4.33	4.74
W		2.30	3.89	5.32	6.68	7.99	9.27	10.53	11.77	13.0	14.21
L		23.0	38.9	53.2	66.8	79.9	92.7	105.3	117.7	130.0	142.1
Q		230	389	532	668	799	927	1053	1177	1300	1421

表 4.7-4 维持试验的抽样方案

失效率 等级	最大的维持 周期 (月)	截尾时间 T_c (10^6 次)									
		$A_c=0$	$A_c=1$	$A_c=2$	$A_c=3$	$A_c=4$	$A_c=5$	$A_c=6$	$A_c=7$	$A_c=8$	$A_c=9$
YW	6	0.308	0.673	1.03	1.39	1.75	2.10	2.45	2.80	3.15	3.50
W	6	0.916	2.02	3.10	4.18	5.25	6.30	7.35	8.40	9.44	10.5
L	12	9.16	20.2	31.0	41.8	52.5	63.0	73.5	84.0	94.4	105
Q	24	91.6	202	310	418	525	630	735	840	944	1050

4.2 可靠性验证试验的程序

4.2.1 定级试验

定级试验的程序如下:

(1) 选定失效率等级, 首次定级试验一般应选失效率等级为 YW 或 W 级。

(2) 选定允许失效数 A_c 和截尾失效数 $r_c (r_c = A_c + 1)$, 推荐在 2~5 的范围内选择 A_c , 不推荐选择 $A_c = 0$ 。

(3) 根据选定的失效率等级和 A_c , 由表 4.7-3 查出截尾时间 T_c 。

(4) 选定试品的试验截止时间 t_z , t_z 应不超过产品标准中规定的电寿命次数, 但不得低于 10^5 次。

(5) 根据 T_c , A_c 及 t_z 由式 (4.7-2) 确定试品数 n , 即

$$n = \frac{T_c}{t_z} + A_c \quad (4.7-2)$$

应注意, 试品数 n 一般不得小于 10。

(6) 从批量生产并经过筛选的合格产品中随机抽取 n 个试品, 供抽样的产品数量应不小于试品数 n 的 10 倍。

(7) 按本章试验方法中的规定进行试验与检测。

(8) 统计相关失效数 r 及各失效试品的相关试验时间 (失效发生时间), 对试验后检测出的相关失效试品, 其相关试验时间按试验结束时的时间计算。

(9) 统计累积相关试验时间 T 。

(10) 试验结果判定。当相关失效数 r 未达到截尾失效数 r_c (即 $r \leq A_c$), 而累积相关试验时间 T 达到或超过了截尾时间 T_c , 则判为试验合格 (接收); 当累积相关试验时间 T 未达到截尾时间 T_c , 而相关失效数 r 达到或超过了截尾失效数 r_c ($r > A_c$), 则判为试验不合格 (拒收)。

4.2.2 维持试验

定级试验合格的产品, 一般情况下, 应按表 4.7-4 中规定的维持周期进行该等级的维持试验, 维持试验按下列程序进行。

(1) 选定允许失效数 A_c 。

(2) 根据产品已试验合格的失效率等级及选定的允许失效数, 由表 4.7-4 查出截尾时间 T_c 。

(3) 选定试品的试验截止时间 t_z (其方法与定级试验时相同)。

(4) 确定试品数 n (其方法与定级试验时相同)。

(5) 抽取试品 (其方法与定级试验时相同)。

(6) 按本章试验方法中的规定进行试验与检测。

(7) 统计相关失效数 r 及各失效试品的相关试验时间 (其方法与定级试验时相同)。

(8) 统计累积相关试验时间 T 。

(9) 试验结果判定 (其方法与定级试验时相同)。

(10) 若维持试验合格, 则应继续按规定的维持周期进行下一次维持试验; 若维持试验不合格, 则应重新进行定级试验, 以确定其失效率等级。

(11) 重新确定失效率等级时, 应将该产品从首次定级试验起的全部试验数据 (包括维持试验不合格的数据) 进行累计, 根据累计的相关失效数及累积的相关试验时间, 由表 4.7-3 确定产品的失效率等级。

4.2.3 升级试验

定级试验合格的产品可继续进行升级试验。升级试验的数据可从定级试验和维持试验的试品进行延长试验, 以及为升级试验投入的试品进行试验得出。升级试验按下列程序进行。

(1) 选定待升的失效率等级 (一般比原定的等级高一级)。

(2) 选定允许失效数 A_c 。

(3) 根据选定的失效率等级及允许失效数由表 4.7-3 查出截尾时间 T_c 。

(4) 根据 T_c 确定延长试验的时间, 以及为升级试验投入的试品数和试验时间。

(5) 抽取试品 (其方法与定级试验时相同)。

(6) 按规定进行试验与检测。

(7) 统计相关失效数 r 及累积相关试验时间 T 。

(8) 试验结果判定 (其方法与定级试验时相同)。

(9) 若升级试验合格, 则应按规定的维持周期进行该等级的维持试验; 若升级试验不合格, 则应重新进行定级试验, 以确定其失效率等级。

(10) 重新确定失效率等级时, 应将该产品的全部试验数据进行累计, 根据累计的相关失效数及累积的相关试验时间由表 4.7-3 确定产品的失效率等级。

5 可靠性试验装置

继电器可靠性试验装置应能执行 GB/T 15510—1995, 通常采用微机进行控制与检测。

5.1 试验装置的技术性能

对于控制继电器的可靠性试验来说, 其总试验时间是相当长的。因此, 要采用多台试品多触点同时进行试验的方法, 试验装置具有多路输出与多路输入。试验进行时, 可以对试品每次动作均监测其所有闭合触点的接触压降及所有断开触点间的电压, 以鉴别触点是否发生接触压降过大或触点间发生桥接、粘接、绝缘电阻过低等故障。另外, 考虑到某些标准中规定的考核方法, 试验装置在试品的每次动作时, 还可以考核其吸合时间和释放时间是否超过规定值。对接触压降、断开触点间的电压、吸合时间、释放时间进行连续性监测。此外, 试验装置在试验过程中应能对电磁继电器的吸合电压、释放电压自动地进行定期测量, 每次测量的时间间隔是可以任意调节的, 对于接触电阻的具体数值也可以定期测量。

试验结束后, 检测试品的绝缘电阻、介质耐压等, 可利用常规试验设备一次性测试。

发生失效时, 装置可以记录失效的试品编号、失效发生的时间和失效模式并整理数据输出报警。

试验的初始参数, 如判断接触压降过大的门限电压、吸合时间的门限值、试验总次数等各种参数值均可通过键盘输入主机, 并且在试验过程中可以随时由键盘修改调整。

为了使试验能更加灵活地进行, 若试验过程中发生失效, 装置可根据输入的控制参数判断试验是否应停止。

试验装置的其他功能还有整定试验操作频率、意外断电后不丢失数据等。断电后如恢复供电, 装置有自启动和由操作人员人工启动两种方法, 无论采用哪种方法都不破坏已产生的数据, 已进行的试验次数也会连续计算下去。

对于试品的电磁系统线圈, 试验装置既可以驱动直流线圈, 也可以驱动交流线圈, 只规定被驱动线圈的电压最大值 (通常这个最大值可达 1000V), 只要用户加到试品线圈上的电压不超过此值, 试验装置便可以进行通断线圈的操作, 对试品触点的类型 (动合、动断、转换等) 均无限制。

5.2 试验装置的硬件设计

对试验装置来说, 除要求高度可靠外, 还应有一些分析处

理能力,能很方便地完成各种试验,以及完成继电器失效的类型判断、打印、报警等。微处理机本身的可靠性一般是相当高的,因而外围设备的选择就显得十分重要了。为了进一步提高整个装置的可靠性,可选用较为成熟的模块线路。同时还应考虑到装置的价格不致太高,对主机的选用不必强调其运算能力,而应当首先选用面向控制的工业控制计算机。其中较为完善的是 STD-BUS 总线模块式工业控制计算机。

STD-BUS 总线全称为工业控制标准总线,而以此标准设计制造的各种计算机模块,便称为 STD-BUS 总线模块。

继电器可靠性试验装置的原理框图如图 4.7-2 所示。下面简述硬件各部分的原理。

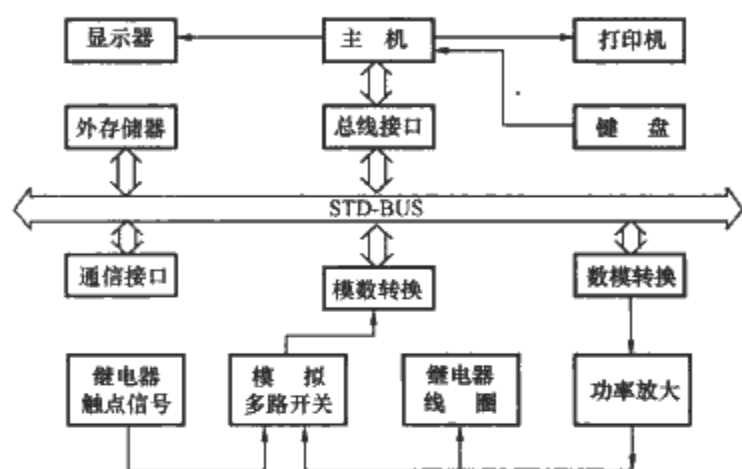


图 4.7-2 继电器可靠性试验装置的原理框图

5.2.1 主机

主机采用功能较为完善的微处理机系统。严格地说,主机并不是 STD-BUS 总线模块,而是一个带有 STD-BUS 接口的微机系统。这样可保持主机的完整功能和灵活配接。利用编在主机内存存储器的程序(此程序是固化在主机内存存储器的),按规定的试验方法,使各种模块板协调工作,即可完成可靠性试验工作。主机本身直接控制着显示器、打印机及键盘设备,在其内部也配有计时器硬件。所以,所有试验中得到的数据及试验的进行情况均可显示出来。操作人员可通过键盘控制试验的参数、安排试验。借助于键盘,也可进行一些特殊的试验,试验的数据可以直接输出,供高级计算机进行数据分析,也可稍加分析和处理后在打印机上打印输出,供操作人员分析。主机一般不进行数理统计之类较为复杂的数学运算。

5.2.2 数模转换板

数模(D/A)转换板把主机送来的数字量转换成模拟量。经过功率放大后,变成足以驱动多台试品(继电器)线圈的模拟电压,此电压通常为线圈的额定电压,以完成线圈的通电。当数模转换器输出电压为零时,线圈断电,在需要测量试品的吸合电压时,主机送到数模转换板的是连续增加的数字量,并应符合试验加压方法的要求。而加在线圈上的模拟电压也就成了符合规定电压波形的电压了。同时主机还在每一次升压之间不断地测量线圈两端的电压和检测相应触点的闭合情况。这样便可测出试品的吸合电压。当需要测量试品的释放电压时,主机送来的是一系列连续减少的数字量而不是增加的数字量,其他的过程和测量吸合电压时相仿。需要说明的是,上述的升压、降压过程只适用于直流线圈,对于交流线圈不能简单地用放大后的模拟电压驱动,而必须采取其他的措施。

5.2.3 模数转换板

模数转换板把外部的模拟电压转换成数字量,供主机测量触点的接触压降、断开触点间电压及线圈电压。该模块通过一个多路开关由多路模拟信号共同使用。一般把各路触点

上的电压量和各个继电器线圈上的电压量都同时送到多路开关的输入端,而是否送入模数转换板则要由主机来控制。主机在任一时刻只选通某一路信号,通过多路开关到达模数转换板的输入端,而不需要的电压信号便被隔离在多路开关的输入端。这样,多对触点的电压和多台试品线圈上的电压便可进行分时转换了。同时被测触点的对数一般在 40~120 对较好。触点对数太多时将影响试验的操作频率,触点对数太少时会使得试验不得不分成许多批来做,这两种情况均会影响试验速度。对于试品的台数,一般根据触点数目的多少选定,但无论试品台数多少几乎都不影响试验的时间。因为线圈电压是定期测量而不是每次动作都测量。

5.2.4 扩展外存

扩展外存的作用是存储大量的试验数据,主要以磁性记录设备为主,因为向外存储器存取数据要占用主机一定的时间,所以并不是每一个试验数据都立即送入外存储器的,而是先保存在主机的内存存储器当中,当数据在内存存储器中有一定量后,便成批地转移到外存储器中。外存储器是对内存存储器的补充,当试验数据不多时,一般不必使用外存储器。通常几十万次的可靠性试验,内存存储量也十分富裕了。

整个模块系统安装在专用的插座上,该插座可任意增加模块使系统的功能增加。

5.3 试验装置的软件设计

程序流程图如图 4.7-3 所示。

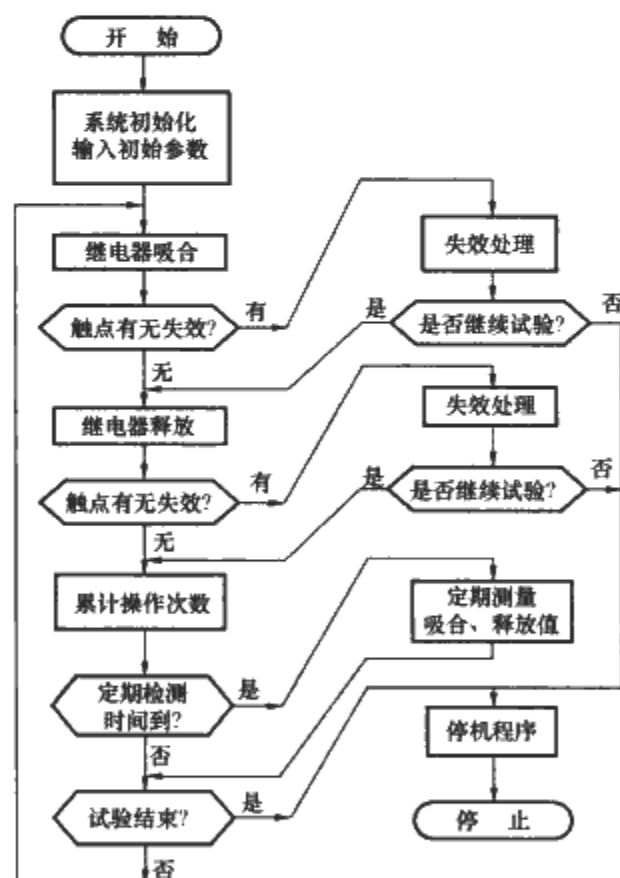


图 4.7-3 程序流程图

软件的主要程序段有下列几项。

5.3.1 系统初始化

(1) 系统自检。检查存储器、打印机、各个模块是否正常工作。

(2) 查对试品的接线。由于在一台试品上可以同时有动合、动断及转换触点,故本装置可自动查对出任意一台试品上的触点有多少对、各是什么形式的触点。这种查对的结果可以打印成表格输出,以供操作人员核对接线是否有误。

5.3.2 初始参数的输入

(1) 由操作人员通过键盘将初始数据,如操作频率、试验

总次数、接触压降的门限值等参数,输入至系统的内存存储器。

(2) 输出打印所有原始参数,供操作人员核对。对于不合逻辑的输入(通常由操作人员的误操作造成),程序软件会筛选出来,以完成纠错的任务。

(3) 依据初始参数完成试验系统中各部分的设定。

5.3.3 线圈的加电

主机通过驱动器将额定电压加到线圈上。考虑到试验的需要,某一试品失去继续试验的意义后(如发生了不可恢复的故障),主机将通过一个屏蔽子程序撤除该试品,这时当线圈加电时额定电压不会加到该试品的线圈上。

5.3.4 线圈断电

线圈断电即切断线圈的电源。

5.3.5 判定试品有无失效产生

(1) 判定所有应当闭合的触点的接触压降是否过大。

(2) 判定所有应当打开的触点间的电压是否过低。

(3) 判定每台试品的吸合时间和释放时间是否超过了规定值。

5.3.6 故障处理

(1) 当判断出有失效发生时,该程序可分析出失效形

式,输出失效发生的时间、失效触点的编号和失效试品的编号,同时将失效的数据存入内存存储器备查。

(2) 依据输入的初始参数,决定发生失效的试品是否继续试验下去或者整个试验是否可以结束。

5.3.7 定期测量

当每次动作累加到预先设定的时间后,该程序完成吸合电压、释放电压、触点压降等参数的测量工作并输出结果。

5.3.8 结束程序

(1) 重复上面的定期测量工作。

(2) 整理全部数据,打印详细的试验报告。

(3) 发出停机信号并使有关模块复位。

5.3.9 停机

在程序流程中,每个操作完成后,系统处于键盘扫描状态,这就是说控制人员可正常中断程序流程,一般不会中断某项正在进行的工作。如果确有必要,也可以通过专门的复位键使试验立即停止,无论怎样,已得到的试验结果数据均不会丢失。程序中专门有一套清除数据的复杂操作指令,所以不会因误操作而造成数据的丢失。

第8章 接触器的可靠性指标与考核方法

1 可靠性指标

接触器一般用于控制各种电动机，所以它是各种控制系统和设备中应用很广的电器元件。它的可靠性水平直接影响到各种控制系统和设备的可靠性。上海电器科学研究所（集团）有限公司和河北工业大学等单位制定了 JB/T 10522—2005《小容量交流接触器可靠性试验方法》，本章结合该标准进行阐述。该标准中将接触器的可靠性指标用失效率等级来表示，如表 4.8-1 所示。

表 4.8-1 接触器失效率等级名称、符号和最大失效率

失效率等级名称	失效率等级符号	最大失效率 (1/10 次)
亚五级	YW	3×10^{-5}
五 级	W	10^{-5}
亚六级	YL	3×10^{-6}
六 级	L	10^{-6}
亚七级	YQ	3×10^{-7}
七 级	Q	10^{-7}

2 试验要求

2.1 环境条件

试验在 GB 14048.1—2006《低压开关设备和控制设备 第1部分：总则》规定的正常使用条件下进行：温度为 $(-5 \sim +40)^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为 50%~90%。或在被试产品标准或技术条件规定的使用环境条件下进行。

2.2 安装条件

- (1) 试品应安装在正常使用位置。
- (2) 试品应安装在无显著冲击和振动的地方。
- (3) 试品安装面与垂直面的倾斜度应符合产品标准的规定。
- (4) 对于采用安装轨安装的接触器，安装轨应符合 GB/T 19334—2003《低压开关设备和控制设备的尺寸 在成套开关设备和控制设备中作电器机械支承的标准安装轨》的规定。

2.3 试验电源条件

- (1) 交流电源为正弦波电源。
 - 1) 波形畸变因数不大于 5%。
 - 2) 频率为 50Hz 或 60Hz，其允许偏差为 $\pm 5\%$ 。
- (2) 直流电源的纹波系数不大于 5%。

2.4 负载条件

(1) 为检测主触头、辅助触头是否正常地工作，可分别将主触头、辅助触头接入各自的检测线路，称为主触头电路及辅助触头电路。

- (2) 触头电路的负载可采用阻性负载。
- (3) 触头电路的电源可采用直流 24V（或 12V）电源，相应的触头电路的电流为 1A（或 0.1A）。
- (4) 试验中，当触头接通负载时，触头电路电源电压的波动相对于空载电压而言应不大于 5%。

2.5 激励条件

- (1) 试验时，试品应以输入激励量的额定值进行激励。
- (2) 试验时试品每小时的循环次数不低于产品标准中规定的额定值，为缩短试验时间，在不影响试品正常动作及不改变试品失效机理的条件下，允许提高每小时的循环次数，但最大值为 7200 次。
- (3) 负载因数应根据产品标准选取，或从下列推荐数值中选取：15%，25%，40%，60%。

3 试验方法

3.1 试品的准备

试品应从稳定的工艺条件下批量生产并经过筛选的合格产品中随机抽取，供抽样的产品应不少于被抽试品数的 10 倍。

3.2 试品的检测

3.2.1 试验前检测

试验前先对试品进行开箱检测，检查试品的零部件有无运输引起的损坏、断裂，剔除零部件损坏的试品，并按规定补足试品数。剔除掉的试品不计入相关失效数 r 内。

3.2.2 试验过程中检测

试验中，检测线路应对产品的所有动合辅助触头、动断辅助触头及一个主触头进行监测，监测辅助触头、主触头是否正常地工作。应对试品的触头在每次循环的“接通”期的 40% 时间内与“断开”期的 40% 时间内，监测闭合触头的接触压降及断开触头间的电压。试验过程中不允许对试品进行清理和调整。

3.2.3 试验后检测

- (1) 零部件有无破损、断裂。
- (2) 吸合电压。
- (3) 释放电压。

3.3 失效判据

- 当出现下列任意一种情况时，即认为该试品失效。
- (1) 接通触头的接触压降 U_j 超过触头电路电源电压的 10%，即 2.4V（或 1.2V）。
 - (2) 分断触头间的电压 U_f 低于触头电路电源电压的 90%，即 21.6V（或 10.8V）。
 - (3) 线圈通电时不动作。
 - (4) 线圈断电时不返回。
 - (5) 零部件有破坏性损坏，零部件松动。
 - (6) 机械运动阻滞、卡死。

(7) 有明显的噪声（噪声是因为短路环、铁心等损坏性故障引起的）。

4 可靠性验证试验的抽样方案及试验程序

4.1 可靠性验证试验的抽样方案

接触器的可靠性验证试验又称为失效率试验，失效率试验分为失效率定级试验、维持试验与升级试验。

定级试验是指为首次确定产品的失效率等级而进行的试

验，或在某一失效率等级的维持试验或升级试验失败后，对产品重新确定其失效率等级而进行的试验。

维持试验是指为证明产品的失效率等级仍不低于定级试验或升级试验后所确定的失效率等级而进行的试验。

升级试验是指为证明产品的失效率等级比原定的失效率等级更高而进行的试验。

定级试验和升级试验的置信度取为 0.9，其抽样方案见表 4.8-2。维持试验的置信度取 0.6，其抽样方案见表 4.8-3。

表 4.8-2 定级试验和升级试验的抽样方案

失效率等级	截尾时间 T_c (10^6 次)									
	$A_c=0$	$A_c=1$	$A_c=2$	$A_c=3$	$A_c=4$	$A_c=5$	$A_c=6$	$A_c=7$	$A_c=8$	$A_c=9$
YW	0.768	1.30	1.77	2.23	2.66	3.09	3.51	3.92	4.33	4.74
W	2.30	3.89	5.32	6.68	7.99	9.27	10.53	11.77	13.0	14.21
YL	7.68	13	17.7	22.3	26.6	30.9	35.1	39.2	43.3	47.4
L	23.0	38.9	53.2	66.8	79.9	92.7	105.3	117.7	130.0	142.1
YQ	76.8	130	177	223	266	309	351	392	433	474
Q	230	389	532	668	799	927	1053	1177	1300	1421

表 4.8-3 维持试验的抽样方案

失效率等级	最大的维持周期 (月)	截尾时间 T_c (10^6 次)									
		$A_c=0$	$A_c=1$	$A_c=2$	$A_c=3$	$A_c=4$	$A_c=5$	$A_c=6$	$A_c=7$	$A_c=8$	$A_c=9$
YW	24	0.306	0.673	1.03	1.39	1.75	2.10	2.45	2.80	3.15	3.50
W	24	0.916	2.02	3.10	4.18	5.25	6.30	7.35	8.40	9.44	10.5
YL	24	3.06	6.73	10.3	13.9	17.5	21	24.5	28	31.5	35
L	48	9.16	20.2	31.0	41.8	52.5	63.0	73.5	84.0	94.4	105
YQ	48	30.6	67.3	103	139	175	210	245	280	315	350
Q	48	91.6	202	310	418	525	630	735	840	944	1050

4.2 可靠性验证试验的程序

4.2.1 定级试验

定级试验的程序如下：

(1) 选定失效率等级，首次定级试验一般应选失效率等级为 YW 或 W 级。

(2) 选定允许失效数 A_c 和截尾失效数 r_c ($r_c = A_c + 1$)，推荐在 2~5 的范围内选择 A_c ，不推荐选择 $A_c=0$ 。

(3) 根据选定的失效率等级和 A_c ，由表 4.8-2 查出截尾时间 T_c 。

(4) 选定试品的试验截止时间 t_z ， t_z 不得低于 10^5 次。

(5) 根据 T_c 、 A_c 及 t_z 由式 (4.8-1) 确定试品数 n ，即

$$n = \frac{T_c}{t_z} + A_c \tag{4.8-1}$$

应注意，试品数 n 一般不得小于 10。

(6) 从批量生产并经过筛选的合格产品中随机抽取 n 个试品。

(7) 按本章试验方法中的规定进行试验与检测。

(8) 统计相关失效数 r 及各失效试品的相关试验时间（失效发生时间），对试验后检测出的相关失效试品，其相关试验时间按试验结束时的时间计算。

(9) 统计累积相关试验时间 T 。

(10) 试验结果判定：当相关失效数 r 未达到截尾失效数 r_c （即 $r \leq A_c$ ），而累积相关试验时间 T 达到或超过了截尾时间 T_c ，则判为试验合格（接收）；当累积相关试验时间

T 未达到截尾时间 T_c ，而相关失效数 r 达到或超过了截尾失效数 r_c （即 $r > A_c$ ），则判为试验不合格（拒收）。

4.2.2 维持试验

定级试验合格的产品，一般情况下，应按表 4.8-3 中规定的维持周期进行该等级的维持试验，维持试验按下列程序进行：

(1) 选定允许失效数 A_c 。

(2) 根据产品已试验合格的失效率等级及选定的允许失效数，由表 4.8-3 查出截尾时间 T_c 。

(3) 选定试品的试验截止时间 t_z （其方法与定级试验时相同）。

(4) 确定试品数 n （其方法与定级试验时相同）。

(5) 抽取试品（其方法与定级试验时相同）。

(6) 按本章试验方法中的规定进行试验与检测。

(7) 统计相关失效数 r 及各失效试品的相关试验时间（其方法与定级试验时相同）。

(8) 统计累积相关试验时间 T 。

(9) 试验结果判定（其方法与定级试验时相同）。

(10) 若维持试验合格，则应继续按规定的维持周期进行下一次维持试验；若维持试验不合格，则应重新进行定级试验，以确定其失效率等级。

(11) 重新确定失效率等级时，应将该产品从首次定级试验起的全部试验数据（包括维持试验不合格的数据）进行累计，根据累计的相关失效数及累积的相关试验时间，由表 4.8-2 确定产品的失效率等级。

4.2.3 升级试验

定级试验合格的产品可继续进行升级试验。升级试验的数据可从定级试验和维持试验的试品进行延长试验,以及为升级试验投入的试品进行试验得出。升级试验按下列程序进行:

- (1) 选定待升的失效率等级(一般比原定的等级高一级)。
- (2) 选定允许失效数 A_c 。
- (3) 根据选定的失效率等级及允许失效数由表 4.8-2 查出截尾时间 T_c 。
- (4) 根据 T_c 确定延长试验的时间,以及为升级试验投入的试品数和试验时间。
- (5) 抽取试品(其方法与定级试验时相同)。
- (6) 按规定进行试验与检测。
- (7) 统计相关失效数 r 及累积相关试验时间 T 。
- (8) 试验结果判定(其方法与定级试验时相同)。
- (9) 若升级试验合格,则应按规定的维持周期进行该等级的维持试验;若升级试验不合格,则应重新进行定级试验,以确定其失效率等级。
- (10) 重新确定失效率等级时,应将该产品的全部试验数据进行累计,根据累计的相关失效数及累积的相关试验时间由表 4.8-2 确定产品的失效率等级。

5 可靠性试验装置

5.1 试验装置的技术性能

试验装置能够同时控制 32 台交流接触器进行可靠性试验,能满足可靠性指标考核时的抽样要求。在试品每次动作时均可监测其是否正常动作(包括检测其动作时间是否合乎要求)。当某一试品发生故障时,装置能自动检测出来,并将故障发生时的操作次数、故障类型及出现故障的试品编号自动打印出来。

当某一试品累计出现 n 次故障时(可由键盘输入任意的 n 值),可自动将其剔除,以防试品发生衔铁卡住而使线圈烧坏时可能引起的电源故障。

寿命试验时各种型号的接触器要求的负载因数是不同的,在试验装置中,操作频率及负载因数等参数可以由用户自行整定调节。

对于每台试品,可检测一对动合触头信号(也可以把几对动合触头串联起来),这样共有 32 路检测信号。当试品正常吸合时,检测到的信号应为逻辑“1”;当试品未可靠吸合时,检测到的信号应为逻辑“0”。

5.2 试验装置的硬件设计

接触器可靠性试验装置的硬件框图如图 4.8-1 所示。除了对试品进行操作与检测的输入、输出电路外,其余的电路均为一般外围电路的典型结构。

5.2.1 输入部分

输入部分是由分压器、输入缓冲器等部分组成的。

输入端的 5V 电压是由直流 220V 分压得到的。因为当接触器吸合时,会有尘埃膜附于触头上,如果直接将 5V 电压加在触头两端,往往不能击穿薄膜使装置发生误判断。当采用分压装置后,如发生上述情况,触头两端 220V 的电压产生的电场一般会使薄膜击穿。输入端采用阻容滤波,以消除输入端的脉冲干扰。

对于触头的闭合情况,经缓冲器和总线驱动器由 CPU

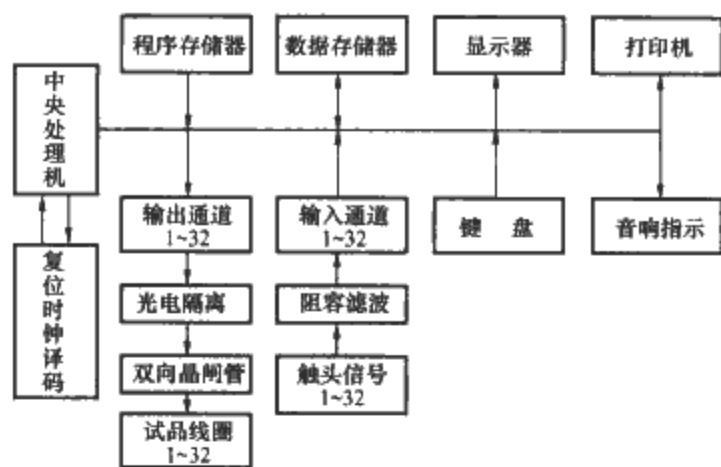


图 4.8-1 接触器可靠性试验装置的硬件框图

取走进行处理。

5.2.2 输出部分

输出部分是由锁存器、放大电路、光电隔离电路和双向晶闸管电路组成的。

当 CPU 向锁存器送入数据后,此数据可以控制相应的光耦合器导通或截止。于是在双向晶闸管的触发端就加上了相应的触发信号,使晶闸管导通或在电流过零后截止。

5.2.3 抗干扰措施

在实际应用中,试验装置通常所处的环境相当恶劣。各种大功率的电气机械(如电动机、电焊机、起重机等)的频繁起动,可能出现瞬时的电网电压降低现象,也可能出现频谱范围很广的尖脉冲干扰和强电噪声干扰。因此,在硬件设计时,必须对输入部分和输出部分采用相应的抗干扰措施。

首先对输出部分采用光电隔离器件,实现微机部分和控制输出部分的电气隔离,避免形成对地环路。在输入部分采用阻容滤波,有效地消除了输入端的脉冲干扰。

在电源输入端,220V 交流稳压器用以减小电网波动的影响,然后经过一个低通滤波器接至微机的专用稳压电源,给微机供电。

在布线方面,尽量使强电、弱电分开,输入、输出引线采用双绞线,以消除电磁干扰。双向晶闸管单独装在印制线路板上,避免强辐射对主机产生不良影响。

5.3 试验装置的软件设计

5.3.1 设计原理

为了减小电源的冲击电流,程序设计时,将试品的驱动设计成巡回驱动,并在相应的时间内检测触头,以判定是否正常动作。首先把 32 台试品分成四组,然后按一定顺序轮流驱动四组试品并检测,完成顺序动作检测。

为了增加灵活性,软件采用程序模块的结构,主要模块有:

- (1) 初始化模块段。
- (2) 吸合释放模块段。
- (3) 判断故障模块段。
- (4) 系统服务程序模块段。

为了增加软件运行的可靠性,在程序中加入了运行的自纠错软件。

5.3.2 软件功能及编制

- (1) 初始化模块。它完成系统的复位操作,接收操作人员由键盘输入的各种控制参数,如操作频率等。
- (2) 吸合释放模块。它完成对试品的吸合释放操作。
- (3) 主程序模块。它是一个核心模块,给出相应的控制信号并调用吸合释放子程序,使试品循环动作。主程序模块框图如图 4.8-2 所示。

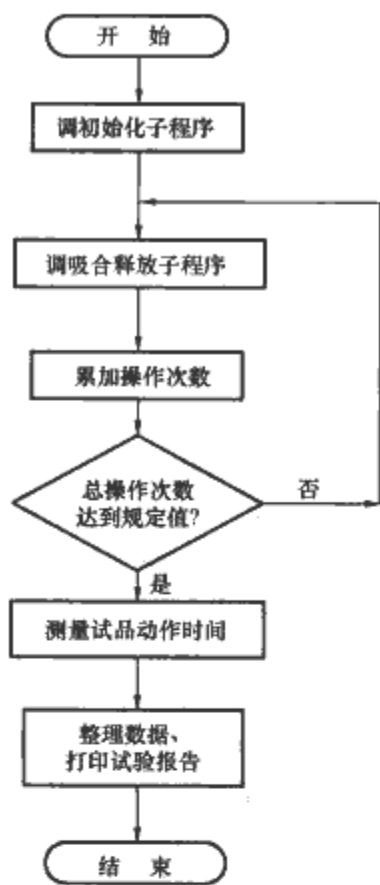


图 4.8-2 主程序模块框图

(4)判断故障模块。因为共有32路输入信号,并且32路输入信号有时间差,所以对故障判断不是同步的,而是控制在

每台试品应检测的时刻,并且注意避开触头的回跳时间。检测中如果一旦出现未可靠吸合或未可靠打开的情况,则软件会自动记录下故障发生的时间、故障发生的试品编号,以及故障类型和该试品发生故障的累计次数。

(5)系统服务程序模块。它的主要功能是控制打印机、转换各种数码的码制、显示和键盘的服务等一系列系统服务工作。

5.3.3 软件的运行方式

软件的运行方式有三种。

(1)出现故障时,在记录并打印后试验继续进行。该方式主要应用于工作人员不在现场的情况下。

(2)出现故障时,在记录并打印后自动延时,以等待试验人员观察处理,延时时间的长短可以由试验人员输入设定,一般为几分钟。

(3)出现故障时,在记录并打印后自动处于待机状态,直到工作人员重新起动。

整个试验结束后,可自动测试一次各试品的动作时间并打印输出。然后把整个试验过程中所有的试验数据加以整理,在打印机上输出试验的详细报告。

由于该装置的数据存储器采用带蓄电池保护的电路,因此,要进行一系列的复杂操作才能将数据清除,而断电、复位等均不会导致数据丢失,并且断电后再恢复供电也可以自动恢复运行,两次试验的参数数据是完全连续的。

第 9 章 小型断路器的可靠性指标与考核方法

1 可靠性指标

小型断路器是一种结构十分紧凑的小容量塑料外壳断路器。它是由低压断路器分支出来的，现今已成为终端电器中的一个大类。按照 IEC 898—1987《家用断路器及类似装置用过电流保护断路器》及 GB 10963.1—2005《电气附件——家用及类似场所用过电流保护断路器第 1 部分：用于交流的断路器》的定义，小型断路器是指：“用于交流 50Hz、电压 380V 及以下、电流 125A 及以下、额定极限短路分断能力不超过 25000A 的交流断路器”。

随着日常生活电气化程度的提高和城市建设的发展，使非工业用电量不断增加，电气设备的安全运行及保护已成为重要的问题。在这种情况下，习惯采用的刀开关和熔断器组合的做法已不能满足要求。因而对高性能小型断路器的需求量在迅速增加，由此，小型断路器的年产量也在不断提高。小型断路器可靠性的高低直接影响到配电线路上的设备是否能安全运行，与千家万户的日常生活息息相关；又由于它的产量大、应用范围广，若其可靠性不高，则其发生故障给用户造成的经济损失将会非常严重。因此，小型断路器的可靠性研究是十分迫切和必要的，这已成为电器领域中一项重要工作，对保证和提高小型断路器的质量和可靠性具有深远的意义。

随着小型断路器技术的不断发展，各国标准委员会均相继制定了产品技术规范和标准。国际电工委员会家用断路器及类似设备分委员会（SC23E）也在 1987 年制定了标准 IEC 898—1987。我国近年来在电器产品方面，实施积极采纳或等同采用 IEC 国际通用标准的方针。为了促进小型断路器的发展，继 IEC 898—1987 标准公布后，于 1989 年正式颁布实施 GB 10963—1989《家用及类似场所用过电流保护断路器》。1995 年 IEC 将上述标准修订为 IEC 60898；1995，我国也于 1999 年等同采用 IEC 制定了 GB 10963.1—2005。河北工业大学和上海电器科学研究所（集团）有限公司等单位制定了 JB/T 10493—2005《家用和类似用途的过电流保护断路器的可靠性试验方法》。

小型断路器属于保护类电器，用于保护电气线路及设备的安全，与控制用继电器、小容量交流接触器等频繁操作的控制类电器不同。当电气线路或用电设备发生过载、短路等故障时，其脱扣器应能及时动作，可靠地将电路切断；当电气线路或用电设备处于正常状态时，它的主触头应能可靠接通电路，其脱扣器不应误动作。此外，小型断路器是不频繁操作类电器，其产品标准中规定的电寿命次数远远低于控制继电器和接触器的电寿命次数，一般仅为数千次。

- 通过分析，将小型断路器的主要故障模式分成如下三类：
- （1）操作故障。即小型断路器在手动合闸操作时合不上闸，电路不能接通；小型断路器在手动分闸操作时分不了闸，电路不能断开。
 - （2）误动故障。即当电气线路或用电设备未发生过载、短路故障时，断路器的瞬动脱扣器或延时动作脱扣器动作而使断路器自动分闸。

（3）拒动故障。即当电气线路或用电设备发生过载、短路故障时断路器不能及时可靠地切断故障电流，使电气线路或用电设备得不到可靠的保护。

一般说来，照明线路或用电设备的过载、短路故障不会频繁发生，有的断路器可能几年都遇不到过载、短路故障，而有的断路器可能在一年内会遇到若干次故障，所以，总的说来，拒动故障一般不会频繁发生。此外，从故障的后果来看，操作故障或误动故障虽会造成照明线路或用电设备不能正常通电或不必要的停电，从而产生一定的经济损失，但一般不会造成严重的后果；而拒动故障会危及照明线路或用电设备的安全，甚至会引起建筑物发生火灾，从而可能导致较大的经济损失，其后果比其他两类故障的后果要严重。

由小型断路器的工作特点及故障模式可知，很难用单个的可靠性指标来描述其可靠性。JB/T 10493—2005 针对拒动、误动故障及操作故障这三类故障分别规定两个可靠性指标。对拒动、误动故障而言，可采用保护成功率 R 的高低作为可靠性指标（成功率是指产品在规定的条件下完成规定功能的概率，或在规定条件下试验成功的概率）；对操作故障而言，可采用操作故障率 λ 的大小作为可靠性指标（操作故障率是指已工作到 t 时刻的产品，在 t 时刻后的单位时间内发生操作故障的概率）。小型断路器对用电设备的保护包括过载和短路保护，鉴于发生短路故障时对用电设备所造成的危害比发生过载时严重得多，同时为避免可靠性指标体系过于复杂又不宜采用太多的可靠性指标来描述，因此可以主要考虑小型断路器在线路或设备发生短路时的保护可靠性，故采用瞬动保护成功率 R （以下简称成功率）和操作失效率 λ （以下简称失效率）作为小型断路器的可靠性特征量，并分别将失效率和成功率等级作为其可靠性指标。

推荐按最大失效率 λ_{\max} 的数值分为三个失效率等级（三级、亚四级、四级）；按不可接收的成功率 R_1 的数值分为五个成功率等级（一级、二级、三级、四级、五级）。失效率等级名称和最大失效率 λ_{\max} 见表 4.9-1，成功率等级名称和不可接收的成功率 R_1 见表 4.9-2。

表 4.9-1 小型断路器失效率等级名称和最大失效率 λ_{\max}

失效率等级名称	最大失效率 λ_{\max} (1/10 次)
三级	1×10^{-3}
亚四级	3×10^{-4}
四级	1×10^{-4}

表 4.9-2 小型断路器成功率等级名称和不可接收的成功率 R_1

成功率等级名称	R_1
一级	0.99
二级	0.98
三级	0.97
四级	0.96
五级	0.95

2 试验要求

2.1 试验场所

可靠性试验可以是实验室试验，也可以是现场试验。其优缺点如表 4.9-3 所示。
推荐小型断路器可靠性验证试验采用实验室试验方式。

表 4.9-3 现场试验与实验室试验的优缺点对比

试验种类	现场试验	实验室试验
优点	(1) 需要试验设备较少	(1) 可限定和控制试验条件
	(2) 可提供更现实的试验结果	(2) 能更好地控制受试品性能的监测和失效显示
	(3) 试验费用较低	(3) 试验结果具有再现性和可比性
缺点	不能在严格受控条件下进行	

2.2 试验条件

2.2.1 环境条件

- (1) 温度为 15~35℃；相对湿度为 50%~90%；大气压力为 86~106kPa。
- (2) 避免灰尘和其他污染。
- (3) 试品应在试验的标准大气条件中放置足够的时间（不少于 8h），以使试品达到热平衡。

2.2.2 安装条件

- (1) 以正常使用方式安装在正常使用位置。
- (2) 安装在无显著冲击和振动的地方。
- (3) 试品安装面与垂直面的倾斜度应符合产品标准的规定。
- (4) 采用安装轨安装的断路器，应采用有关安装轨的标准。

2.2.3 试验电源条件

- (1) 交流电源应为频率等于 50Hz 的正弦波电源，其容许偏差为±5%。
- (2) 直流电源可采用发电机、蓄电池或稳压电源。
- (3) 试验过程中，触头接通负载时，试验电源电压的波动相对于空载电压而言应不大于 5%。

2.2.4 负载条件

- (1) 负载电源可为直流电源或交流电源，一般情况下，推荐采用直流电源。
- (2) 负载可为阻性负载、感性负载、容性负载或非线性负载，一般情况下，推荐采用阻性负载。
- (3) 试验时触头电路电源电压 U_e 为 24V 或产品标准中规定的触头最低直流额定电压值。
- (4) 试验时触头电路负载电流 I_e 为 1A。

2.2.5 激励条件

- (1) 操作可靠性试验。 $I_e \leq 32A$ 的断路器：240 次/h，断路器在断开位置时间大于或等于 13s/操作循环； $I_e > 32A$ 的断路器：120 次/h，断路器在断开位置时间大于或等于 28s/操作循环。
- (2) 瞬动保护可靠性试验。C 型断路器：通 $10I_e$ 和 $5I_e$ 电流；D 型断路器：通 $50I_e$ 和 $10I_e$ 电流。

3 试验方法

3.1 试品的准备

试验中所用试品，应从在稳定的工艺条件下批量生产出的合格产品中随机抽取。

3.2 试品的检测

小型断路器可靠性试验的检测内容如表 4.9-4 所示。

表 4.9-4 小型断路器可靠性试验的检测内容

检测内容	操作可靠性试验	瞬动保护可靠性试验 (在操作可靠性试验前后进行)
试验前检测	(1) 试品的零部件是否因运输而损坏、断裂	
	(2) 剔除损坏试品，并按规定补足试品数；剔除掉的试品不计入累积故障试品数 r 内	
试验过程中检测	(1) 在试品每次循环的“接通”期的 40% 时间内，监测闭合触头的接触压降	(1) 从冷态开始，对 C 型断路器所有极通 $10I_e$ 电流（D 型断路器通 $50I_e$ 电流），监测试品是否在 100ms 内动作
	(2) 在试品每次循环的“断开”期的 40% 时间内，监测断开触头间的电压	(2) 待至冷态后，对 C 型断路器通 $5I_e$ 电流（D 型断路器通 $10I_e$ 电流），监测试品的分断时间是否不小于 100ms
试验后检测	(1) 外观检查	—
	(2) 绝缘电阻	
	(3) 介质耐压	

3.3 失效判据

在操作可靠性试验过程中，当出现下列任意一种情况时，即认为该试品失效。

- (1) 闭合触头的接触压降 U_j 超过下列极限值 U_{jx} 。
 - 1) 负载电流为额定电流时，接触压降的极限值 U_{jx} 为触头电路额定电压的 5% 或 10%。
 - 2) 负载电流为 100mA 时，接触压降的极限值 U_{jx} 为 0.5V。
- (2) 断开触头间电压 U_e 低于极限值 U_{ex} ，除非产品标准另有规定， U_{ex} 应为触头电路额定电压的 90% 或 20V。
- (3) 触头发生熔接或其他形式的粘接。
- (4) 断路器合闸时不动作。
- (5) 断路器分闸时不返回。
- (6) 试品零部件有破坏性损坏、连接导线及零部件松动。

试品在操作可靠性试验后应进行外观检查，并检测绝缘电阻及介质耐压，其中任一项目的检测结果不符合产品标准的规定，即认为该试品失效。

瞬动保护可靠性试验中，以下任意一种情况发生时，即认为该次试验失败。

- (1) C 型断路器通过的电流 I 等于断路器额定电流 I_e 的 10 倍（D 型断路器通 $50I_e$ 电流）时，断路器的分断时间大于或等于 100ms。

(2) C型断路器通过的电流 I 等于断路器额定电流 I_e 的5倍(D型断路器通以 $10I_e$ 电流)时,断路器分断时间小于100ms。

4 可靠性验证试验的抽样方案及试验程序

4.1 可靠性验证试验抽样方案

可靠性验证试验方案中有截尾序贯试验和定时或定数截尾试验方案两种,两者各有优缺点。截尾序贯试验方案在作出判决时所需要的平均失效数和平均累积试验时间最少;但最大的累积试验时间及失效数可能会超过相应的定时或定数截尾试验方案。试验费用及试品数的变化幅度也较大,且在

试品、试验设备及人员安排等管理方面存在一定的困难,因此一般适用于价格昂贵的产品可靠性验证试验;而定时或定数截尾试验方案,在试验前就能确定试验的最大累积试验时间或试品的最大数量,从而在试验之前,就可以确定费用、试验设备及人力的最大需要量,因此一般适用于价格较低、生产批量较大的产品可靠性验证试验。

建议在小型断路器的失效率验证试验和成功率验证试验中均采用定时截尾试验方案进行考核。

4.1.1 失效率验证试验抽样方案

失效率验证试验抽样方案的确定方法与第7章中的4.1相同,因此得到失效率验证试验方案如表4.9-5所示。

表 4.9-5 失效率验证试验方案 ($\beta=0.1$)

截尾时间 T_c (10^6 次)	允许失效数 A_c	0	1	2	3	4	5	6	7	8
失效率等级										
三级		2.3	3.89	5.32	6.68	7.99	9.27	10.53	11.77	13.0
亚四级		7.68	13.0	17.7	22.3	26.6	30.9	35.1	39.2	43.3
四级		23.0	38.9	53.2	66.8	79.9	92.7	105.3	117.7	130

4.1.2 成功率验证试验抽样方案

成功率是指产品在规定的条件下完成规定功能的概率或是产品在规定的条件下试验成功的概率。它是包括小型断路器在内的所有保护类电器共有的一个可靠性特征量,是针对其使用中出现的拒动、误动故障而提出的。

根据成功率定数验证试验理论,在四参数 R_0, R_1, α, β 条件下,接收概率 $L(R)$ 与产品成功率 R 间的关系曲线,即成功率抽检特性曲线如图4.9-1所示。

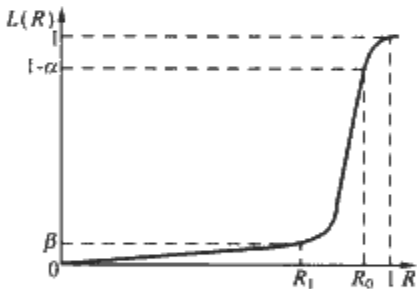


图 4.9-1 成功率抽检特性曲线

R_0 —可接收的成功率; R_1 —不可接收的成功率;
 α —生产者风险; β —使用者风险

由图4.9-1可得到下列关系式

$L(R_0) = 1 - \alpha$ (4.9-1)

$L(R_1) = \beta$ (4.9-2)

为了求 n 和 A_c , 将式(4.9-1)和式(4.9-2)进一步推导并改为

$\sum_{r=0}^{A_c} C_n R_0^n (1 - R_0)^{n-r} \geq 1 - \alpha$ (4.9-3)

$\sum_{r=0}^{A_c} C_n R_1^n (1 - R_1)^{n-r} \geq \beta$ (4.9-4)

由上式求出最小整数解就可以得到成功率验证试验方案。表4.9-6列出了部分成功率验证试验方案。表4.9-6中 $D_R = (1 - R_1) / (1 - R_0)$, 一般称 D_R 为鉴别比; n_i 为作接收判决时所要求的试验数; r_{RE} 为拒收故障数, 它与 A_c 关系为 $r_{RE} = A_c + 1$ 。

根据两参数 R_1 和 β 来确定成功率验证试验方案。表4.9-7为两参数 R_1 和 β 条件下的成功率验证试验方案。

表 4.9-6 四参数 R_0, R_1, α, β 下成功率的定数验证试验方案

R_0	D_R	$\alpha=0.05, \beta=0.05$		$\alpha=0.10, \beta=0.10$		$\alpha=0.20, \beta=0.20$	
		n_i	r_{RE}	n_i	r_{RE}	n_i	r_{RE}
0.99	1.50	5320	66	3215	40	1428	18
	1.75	2581	35	1607	22	714	10
	2.00	1567	23	945	14	453	7
	3.00	521	10	308	6	142	3
0.98	1.50	2620	65	1605	40	713	18
	1.75	1288	35	770	21	356	10
	2.00	781	23	471	14	226	7
	3.00	259	10	153	6	71	3
0.97	1.50	1720	64	1044	39	450	17
	1.75	835	34	512	21	237	10
	2.00	519	23	313	14	150	7

续表

R_0	D_R	$\alpha=0.05, \beta=0.05$		$\alpha=0.10, \beta=0.10$		$\alpha=0.20, \beta=0.20$	
		n_f	r_{RE}	n_f	r_{RE}	n_f	r_{RE}
0.96	3.00	158	9	101	6	47	3
	1.50	1288	64	782	39	337	17
	1.75	625	34	383	21	161	9
	2.00	374	22	234	14	98	6
0.95	3.00	117	9	76	6	35	3
	1.50	1014	63	610	38	269	17
	1.75	486	33	306	21	129	9
	2.00	298	22	187	14	78	6
	3.00	93	9	60	6	28	3

表 4.9-7 成功率验证试验方案 ($\beta=0.1$)

<div><div><div><div><div></div><div>R_1</div></div><div><div>n_t</div><div>A_c</div></div></div></div></div>	1	2	3	4	5	6	7	8
0.95	77	105	132	158	184	209	234	258
0.96	96	132	166	198	230	262	292	323
0.97	129	176	221	265	308	349	390	431
0.98	194	265	333	398	462	525	587	648
0.99	388	531	667	798	926	1051	1175	1297

4.2 试验程序

4.2.1 失效率验证试验程序

失效率验证试验按下列程序进行。

(1) 选定失效率等级，首次试验一般应选失效率等级为三级或亚四级。

(2) 选定允许失效数 A_c 和截尾失效数 $r_c(r_c = A_c + 1)$ ，推荐在 1~5 的范围内选择 A_c ，不推荐选择 $A_c = 0$ 。

(3) 根据选定的失效率等级和 A_c ，由表 4.9-5 查出试验截尾时间 T_c 。

(4) 选定试品的试验截止时间 t_z ， t_z 应不超过产品标准中规定的电寿命次数，推荐 $t_z = 6000$ 次。

(5) 根据 T_c 、 A_c 、 t_z ，由式 (4.9-5) 确定试品数 n 为

$$n = \frac{T_c}{t_z} + A_c \tag{4.9-5}$$

(6) 从批量生产的合格产品中随机抽取 n 个试品，供抽样的产品数量应不小于试品数 n 的 10 倍。

(7) 按上述可靠性试验方法中的规定进行试验与检测。

(8) 统计相关失效数 r 及各失效试品的相关试验时间(失效发生时间)，对试验后检测出的相关失效试品，其相关试验时间按试验结束时的时间计算。

(9) 统计累积相关试验时间 T 。

(10) 试验结果判定：若相关失效数 r 未达到截尾失效数 r_c (即 $r \leq A_c$)，而累积相关试验时间 T 达到或超过了截尾时间 T_c ，则判为试验合格(接收)；若累积相关试验时间 T 未达到截尾时间 T_c ，而相关失效数 r 达到或超过了截尾失效数 r_c (即 $r > A_c$)，则判为试验不合格(拒收)。

4.2.2 成功率验证试验程序

成功率验证试验按下列程序进行。

(1) 选定产品的成功率指标(成功率等级)。

(2) 选定允许失效数 A_c 。

(3) 根据选定的成功率等级和 A_c ，由表 4.9-7 查出作接收判断时所要求的试验数 n_f 。

(4) 选定试品的试验截止次数 n_z ，一般 $n_z = 10$ 次。

(5) 根据 n_f 、 n_z 及 A_c 由式 (4.9-6) 确定试品数 n

$$n = \frac{n_f}{4n_z} + \frac{A_c}{2} \tag{4.9-6}$$

(6) 从批量生产并经过筛选的合格产品中随机抽取 n 个试品，供抽样的产品数量应不小于试品数 n 的 10 倍。

(7) 按上述可靠性试验方法中的规定进行试验与检测。

(8) 统计所有试品总的失败次数 $r_d(r_d = r_1 + r_2)$ ，式中 r_1 为拒动次数， r_2 为误动次数)。

(9) 试验结果判定：若累积试验次数 n_z 达到或超过了作接收判决时所要求的试验数 n_f ，而总的失败次数 r_d 未达到截尾失效数 r_c (即 $r_d \leq A_c$)，则判为试验合格(接收)；若累积试验次数 n_z 未达到作接收判决时所要求的试验数 n_f ，而总的失败次数 r_d 达到或超过截尾失效数 r_c (即 $r_d > A_c$)，则判为试验不合格(拒收)。

5 可靠性试验装置

下面介绍根据 JB/T 10493—2005 研制的小型断路器可靠性试验装置。

5.1 试验装置的技术性能

试验装置的主要技术性能指标如下：

(1) 试验过程中，用户可对可靠性试验参数进行修改整定，如闭合触头的接触压降极限值 U_{jm} ，试验操作频率及总的试验次数等。

(2) 试验装置能同时对 8 台试品进行操作可靠性试验和瞬动保护可靠性试验。

(3) 能同时对 32 对触头进行接触压降及断开触头间电压的监测。

(4) 瞬动保护可靠性试验中，试验装置能根据试验要求，自动调节被测试品回路中的试验电流值。

(5) 能自动记录试验数据及打印，如试验次数、失效试品的编号、失效发生的时间、失效触头的编号及失效类型，并能将故障试品自动切除。

(6) 操作可靠性试验中，试品的操作频率在 10~500

次/h范围内可调, 负载因数可调; 瞬动保护可靠性试验时, 试验装置提供的试验电流可在 0~900A 范围内连续可调。

(7) 能提供 4 组配套的阻性负载 (电压分 24V 和 6V 两种和电流分 1A 和 0.1A 两种)。允许外接负载。

(8) 操作简便, 人机交互界面良好。

5.2 试验装置的硬件设计

小型断路器可靠性试验装置主要由四部分组成: 试验控制柜、试品柜、大电流试验柜和试验负载柜。

其中, 试验控制柜由工业控制机、打印机和试验控制线路板组成, 主要负责完成试验中的所有微机控制与检测工作。试品柜装有 8 台电动机驱动的机械手, 用来控制 8 台试品的合/分闸操作; 同时每台机械手的操作机构都设有合/分闸到位信号检测线路及刹车机构, 以确保合/分闸的准确性, 上述两项操作均在微机控制下完成。大电流试验柜主要由大电流变压器、调压器、采样电阻、采集卡, 以及主回路控制接触器和 8 个支路控制接触器组成。接触器的合/分闸操作亦由微机控制。依照试验要求, 试验装置通过调节调压器依次调节每一试品的试验回路电流为试品的 5 倍/10 倍额定电流, 对试品进行瞬动保护可靠性试验。试验负载柜可提供四组阻性负载, 试验可在 24V 和 6V 两种电压和 1A 和 0.1A 两种电流下进行。

小型断路器可靠性试验装置结构原理框图如图 4.9-2 所示。

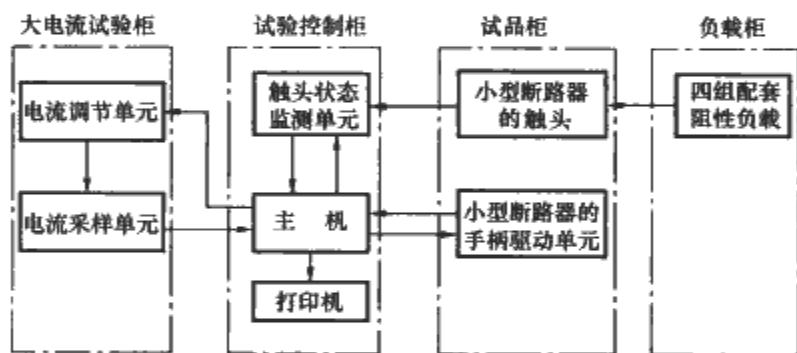


图 4.9-2 小型断路器可靠性试验装置结构原理框图

下面就试验装置中主要组成单元的工作原理进行介绍。

5.2.1 主机

试验装置中的主机在整个试验装置中起着神经中枢的作用。所有与试验相关的控制操作及监测测试工作均由主机控制完成, 如: 试验参数的发送与接收、试品触头状态的监测、电动机的旋转/正反转与停转及被测试品手柄合/分闸到位信号的接收、瞬动保护可靠性试验中试验电流值的采样与调节、试验数据的存储及失效数据的处理等。因此, 采用 PC 总线标准的具有抗干扰能力强的工业控制计算机 (以下简称工控机) 作为本试验装置的主机。

5.2.2 试品手柄合/分闸驱动单元

该功能单元通过微机控制电动机的正反转来完成试品手柄的合/分闸操作, 并在接收到手柄合/分闸到位信号后使电机停转, 因此可由微机控制按照设定的操作频率对试品进行

合/分闸操作。其电路原理框图如图 4.9-3 所示。

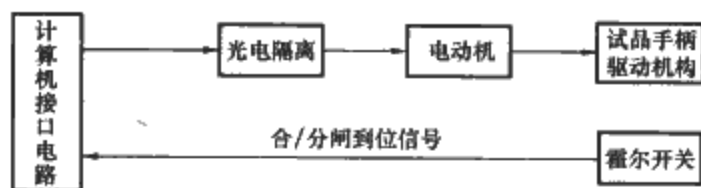


图 4.9-3 手柄合/分闸驱动单元电路原理框图

从工作原理和结构上看, 该功能单元主要分为两部分, 即试品手柄合/分闸驱动电路和合/分闸到位监测电路。

5.2.3 触头状态监测单元

本功能单元的主要功能是在被测试品手柄合/分闸到位后, 在合/分闸期间采集被测试品所有触头的闭合/断开的实际状态, 对其进行辨别比较后将信号电平送至计算机。其电路原理框图如图 4.9-4 所示。

由图 4.9-4 可见, 该功能单元可分为触头状态识别电路和门限电压给定电路两部分。

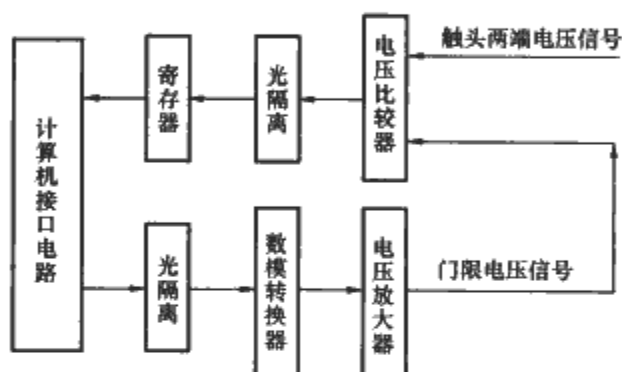


图 4.9-4 触头状态监测单元电路原理框图

5.2.4 试验电流产生单元

大电流试验柜工作原理框图如图 4.9-5 所示。该功能单元可分为试验电流调节电路和试验电流采样电路两部分, 主要功能是在进行瞬动保护可靠性试验时, 为试品提供标准所规定的试验电流。大电流试验柜主要由大电流变压器、电动调压器和八个接触器组成, 经连接导线与试品柜的八个试品构成八路控制线路。为确保调节电流的准确性, 大电流柜中设有信号采集及自动调节系统, 用于每次试验时及时采集试验电流信号, 绘制电流曲线, 计算电流有效值; 并根据计算值与规定值的比较, 控制电动调压器自动调节, 直至达到所要调节的电流值。电流信号的采样及电动调压器的调节均由微机控制完成。

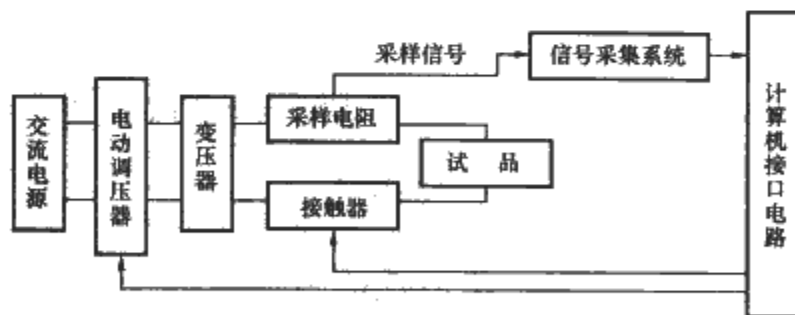


图 4.9-5 大电流试验柜工作原理框图

第 10 章 剩余电流动作保护器的可靠性指标与考核方法

1 可靠性指标

随着工农业及其他行业电气化水平的不断提高，电能已经成为人们生产和生活中不可缺少的能源。随着用电设备的增加和普及，因为电气设备使用不当或线路造成的电气漏电事故时有发生。漏电事故会引起火灾、用电设备损坏及用电人员人身伤害。为了人身安全与用电设备安全，线路中应安装剩余电流动作保护器（以下简称漏电保护器）。

漏电保护器的可靠性研究已引起国际学术界的日益关注。国际电工委员会早在 1983 年出版的 IEC 755《剩余电流动作保护装置一般要求》中明确规定了验证可靠性的方法。1995 年我国颁布的 GB 6829—1995《剩余电流动作保护器的一般要求》等效于 IEC 755。1997 年国家技术监督局批准了 GB 16916.1—2003《家用和类似用途的不带过电流保护的剩余电流动作断路器（RCCB）第 1 部分：一般规则》和 GB 16917.1—2003《家用和类似用途的带过电流保护的剩余电流动作断路器（RCBO）第 1 部分：一般规则》。国家标准 GB 16916.1—2003 和 GB 16917.1—2003 分别与 IEC 61008—1990 和 IEC 61009—1990 等同。这些标准中都提出了可靠性问题，明确了应验证可靠性。GB 6829—1995 中的 7.2.10 条要求测试可靠性。以上标准中虽提出了漏电保护器的可靠性问题，可它仅主要规定了试验条件的严酷性，要求作比较严酷的 28 周期通电试验、耐气候环境试验，但并没有规定漏电保护器的可靠性指标及可靠性试验方法，所以上述各标准中的可靠性试验不是真正的可靠性试验，真正的可靠性试验应涉及可靠性指标、失效判据、试验方案及试验结果的判定等一系列问题。

为了推动我国剩余电流动作保护器可靠性工作的开展，上海电器科学研究所（集团）有限公司和河北工业大学等单位制定了 JB/T 10494—2005《家用和类似用途的剩余电流动作断路器的可靠性试验方法》。

漏电保护器是广泛应用于低压供电线路、防止人身触电和漏电火灾的保护电器。漏电保护器的技术性能主要有剩余电流保护性能和操作性能。漏电保护器的剩余电流保护性能完好时，当用电设备工作正常，没有发生漏电故障时，漏电保护器不动作；一旦发生漏电故障时漏电保护器应迅速分开触头切断电路，以保护触电者的人身安全和避免因漏电而造成的火灾。漏电保护器的操作性能是指：手动操作漏电保护器手柄，手柄合闸操作时能可靠接通电路；手柄分闸操作时能可靠分断电路。以上是漏电保护器的工作特点。

漏电保护器具有以下三种故障形式：

（1）当发生漏电故障时，漏电保护器不能迅速可靠地动作（拒动）。漏电保护器的某些元件质量不合格，运行后引起的老化和损伤导致元件丧失原有的工作性能。例如：零序电流互感器剩磁过大，发热严重；永久磁铁老化；电子元件受损；触头接触不良或熔焊等。拒动是危害性极大的故障，将使触电者的人身安全和用电设备得不到可靠的保护。

（2）没有发生漏电故障时漏电保护器发生误动作而将电

路切断（误动）。电路中一般都存在着剩余电流，剩余电流的存在并不一定反映电路或设备有故障。例如合格的电容器容许有一定的泄漏电流，任何供电网络和用电设备的绝缘电阻都不可能是无穷大，都有一定数量的泄漏电流存在，达到漏电保护器的剩余动作电流时，漏电保护器就会误动作。另外，由于漏电保护器结构性能不稳定，本身动作特性发生改变，负载电流的影响、环境温度的影响、电磁干扰信号通过辅助电源等，都可能使漏电保护器产生误动作。误动故障导致用电电路不应有的停电或用电设备不必要的切断，降低了供电可靠性，会造成一定的经济损失。

（3）操作故障。漏电保护器在手动合闸操作时合不上闸，电路不能接通；漏电保护器在手动分闸操作时不能分闸，电路不能断开。

为尽可能地全面定量反映漏电保护器可靠性，同时考虑到漏电保护器作为保护电器的工作特点及其可能发生拒动、误动故障及操作故障这三类故障的故障模式，针对拒动、误动故障，采用保护成功率 R （简称成功率）的高低作为可靠性指标。保护成功率是指产品在规定条件下完成规定功能的概率，或在规定条件下试验成功的概率。对操作故障而言，可采用操作失效率 λ （简称失效率）的大小作为可靠性指标。失效率是指产品工作到 t 时刻后的单位时间内发生失效的概率。

可以按最大失效率 λ_{\max} 的数值分为三个失效率等级（A 级、B 级、C 级），按不可接收的成功率 R_1 的数值分为五个成功率等级（A 级、B 级、C 级、D 级、E 级）。漏电保护器失效率等级名称和最大失效率 λ_{\max} 见表 4.10-1，成功率等级名称和不可接收的成功率 R_1 见表 4.10-2。

表 4.10-1 漏电保护器失效率等级名称和最大失效率 λ_{\max}

失效率等级名称	最大失效率 λ_{\max} (1/10 次)
A 级	1×10^{-4}
B 级	3×10^{-4}
C 级	1×10^{-3}

表 4.10-2 漏电保护器成功率等级名称和不可接收的成功率 R_1

成功率等级名称	R_1
A 级	0.995
B 级	0.99
C 级	0.98
D 级	0.97
E 级	0.96

2 试验要求

2.1 环境条件

（1）对于成功率验证试验：应进行 28 周期交变湿热循

环试验, 试验周期如图 4.10-1 所示。

(2) 对于失效率验证试验: 温度为 $15\sim 35^{\circ}\text{C}$; 相对湿度为 $50\%\sim 90\%$; 大气压力为 $86\sim 106\text{kPa}$; 避免灰尘和其他污染。

试品应在试验的标准大气条件中放置足够的时间 (不少于 8h), 以使试品达到热平衡。

2.2 安装条件

- (1) 以正常使用方式安装在正常使用位置。
- (2) 试品应安装在无显著冲击和振动的地方。
- (3) 试品安装面与垂直面的倾斜度应符合产品标准的规定。
- (4) 采用安装轨安装的漏电保护器, 应采用有关安装轨的标准。

2.3 试验电源条件

- (1) 交流电源应为频率等于 50Hz 的正弦波电源, 其容许偏差为 $\pm 5\%$ 。
- (2) 直流电源可采用发电机、蓄电池或稳压电源。
- (3) 试验过程中, 触头接通负载时, 试验电源电压的波动相对于空载电压而言应不大于 5% 。

2.4 负载条件

(1) 负载电源可为直流电源或交流电源, 一般情况下, 推荐采用直流电源。

(2) 负载可为阻性负载、感性负载、容性负载或非线性负载, 一般情况下, 推荐采用阻性负载。

(3) 试验时触头电路电源电压 U_c 为 24V 或产品标准中规定的触头最低直流额定电压值。

(4) 除非标准规定试验电流为额定电流, 试验时触头电路负载电流 I_c 为 1A 。

2.5 激励条件

(1) 失效率验证试验。 $I_c \leq 32\text{A}$ 的产品: 240 次/h, 产品在断开位置时间大于或等于 13s /操作循环; $I_c > 32\text{A}$ 的产品: 120 次/h, 产品在断开位置时间大于或等于 28s /操作循环。

(2) 成功率验证试验。误动测试时, 通以额定剩余不动作电流; 拒动测试时通以额定剩余动作电流。

成功率验证试验采用 28 周期交变湿热循环试验作为环境条件, 根据 GB/T 2423.4—1993《电工电子产品基本环境试验规程 试验 Db: 交变湿热试验方法》规定的试验 Db 进行。

试验严酷等级: 高温温度为 55°C , 试验周期为 28 天。

试验周期说明如下:

1) 试验温度应逐渐上升到规定的合适上限温度。上限温度应在 $3\text{h} \pm 30\text{min}$ 的时间内达到, 温度上升速度在图 4.10-1 阴影面积规定的范围内。在这期间, 相对湿度应不小于 95% , 并应在漏电保护器上产生凝露。

注: 产生凝露的条件是指漏电保护器的表面温度低于大气的露点。这意味着, 如果热时间常数较小时, 则相对湿度必须大于 95% , 应注意冷凝水滴不能落到试品上。

2) 然后温度应基本上恒定在上限温度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的规定极限范围内, 至试验周期开始后的 $12\text{h} \pm 30\text{min}$ 。在此期间, 除了最初和最后 15min 相对湿度应在 $90\%\sim 100\%$, 其余时间的相对湿度应为 $93\% \pm 3\%$ 。

在最后 15min , 漏电保护器上不应产生凝露。

3) 然后, 温度应在 $3\sim 6\text{h}$ 内降到 $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 。

开始 $1\text{h} \pm 30\text{min}$ 的降温速率应是这样的: 如果保持

图 4.10-1 所示的速率, 将在 $3\text{h} \pm 15\text{min}$ 内达到 $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 的温度。

在降温期间, 除了开始 15min 相对湿度应不小于 90% 外, 其余时间的相对湿度应不小于 95% 。

4) 接着, 温度保持在 $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, 相对湿度不小于 95% 直至 24h 周期结束。

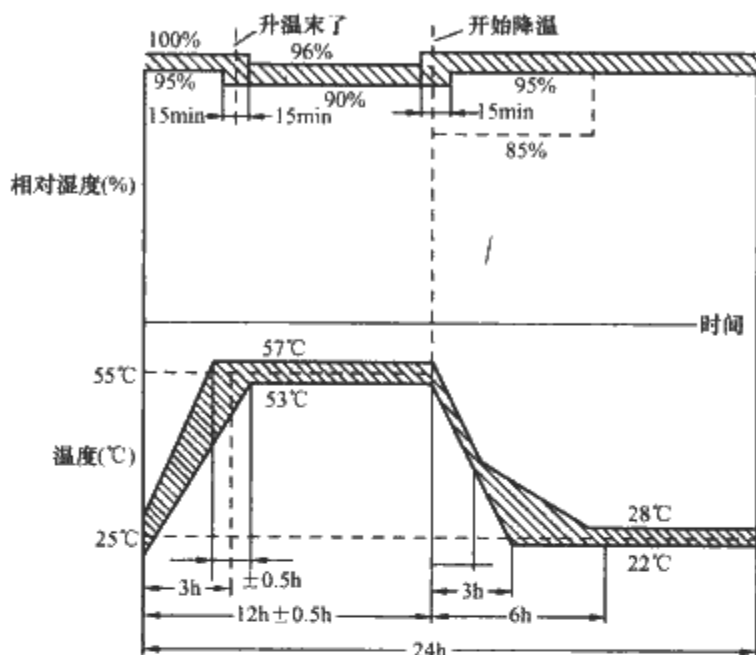


图 4.10-1 成功率验证试验的试验周期

3 试验方法

3.1 试品的准备

试验中所用试品应该是从在稳定的工艺条件下批量生产并经过筛选的合格产品中随机抽取的。

3.2 试品的检测

试品检测可以分为可靠性试验前检测、试验过程中检测及试验后检测三项。试验前检测主要是剔除那些由于运输或其他原因引起零部件损坏的试品并补足试验所需要的试品数。在此阶段发现的失效试品不应计入相关失效数。漏电保护器试验过程中的检测分为失效率验证试验和成功率验证试验检测。试验后检测是对未失效的试品进行检测。尽管在试验过程中的检测项目上这些试品未失效, 经过长时间的循环检测后, 应对试品的外观检查、绝缘电阻、介质耐压及接触电阻等项目进行一次检测。

3.2.1 试验前检测

试验前先对试品进行开箱检测, 检查试品的零部件有无运输引起的损坏、断裂, 剔除零部件损坏的试品, 并按规定补足试品数, 剔除掉的试品不计入累积故障试品数 r 内。

3.2.2 试验过程中检测

(1) 成功率验证试验的检测。

1) 漏电保护器误动检测。在成功率验证试验过程中, 对试品通以额定剩余不动作电流, 检测试品是否动作。

2) 漏电保护器拒动检测。对试品通以额定剩余动作电流, 检测试品是否在规定时间内动作。

3) 漏电保护器试验按钮检测。按下操作漏电保护器的试验按钮, 检测试品是否动作。

(2) 失效率验证试验的检测。除非产品标准另有规定, 应对试品的所有触头在试品每次循环的“接通”期的 40% 时间内与“断开”期的 40% 时间内, 监测闭合触头的接触压降及断开触头间的电压。

3.2.3 试验后检测

除非产品标准另有规定，试验后应对所有未发生故障试品的下列项目进行测试：

- (1) 外观检查。
- (2) 绝缘电阻。
- (3) 介质耐压。
- (4) 接触电阻。

3.3 失效判据

3.3.1 成功率验证试验的失效判据

成功率验证试验中，以下任意一种情况发生时，即认为该次试验失败。

- (1) 在成功率验证试验过程中，即交变湿热循环试验中，试品通以额定剩余不动作电流 $I_{\Delta no}$ ，试品误动作。
- (2) 对试品通以额定剩余动作电流 $I_{\Delta n}$ ，试品未在规定时间内动作。
- (3) 按下漏电保护器的试验按钮时，试品未脱扣。
- (4) 试品零部件有破坏性损坏，不能正常闭合与分断。

3.3.2 失效率验证试验的失效判据

在失效率验证试验过程中，当出现下列任意一种情况时，即认为该试品失效。

- (1) 闭合触头的接触压降 U_j 超过下列极限值 U_{jx} 。
 - 1) 负载电流为额定电流时，接触压降的极限值 U_{jx} 为触头电路电源电压 U_e 的 5% 或 10%。
 - 2) 负载电流为 100mA 时，接触压降的极限值 U_{jx} 为 0.5V。

- (2) 断开触头间电压 U_e 低于极限值 U_{ex} ，除非产品标准另有规定， U_{ex} 应为触头电路电源电压的 90% 或 20V。
- (3) 触头发生熔焊或其他形式的粘接。
- (4) 漏电保护器合闸时不动作。
- (5) 漏电保护器分闸时不返回。
- (6) 试品零部件有破坏性损坏、连接导线及零部件松动。

(7) 试品在失效率验证试验后应进行外观检查，并检测绝缘电阻、接触电阻及介质耐压，其中任一项目的检测结果不符合产品标准的规定，即认为该试品失效。

4 可靠性验证试验的抽样方案及试验程序

漏电保护器的可靠性验证试验方法可参照小型断路器可靠性指标的考核方法中叙述的方法进行。

4.1 失效率验证试验方案的确定

不同失效率等级的失效率验证试验方案如表 4.10-3 所示。

4.2 成功率验证试验方案的确定

给定 A_c 值，由式 (4.9-4) 确定出 n 的最小解 n_i (n_i 为作接收判断时所要求的试验数)，即确定出在两个参数 R_1 、 β 条件下的成功率验证试验方案，如表 4.10-4 所示。

表 4.10-3 失效率验证试验方案

截尾时间 T_e (10^4 次) 失效率等级		允许失效数 A_c								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
A 级		23.0	38.9	53.2	66.8	79.9	92.7	105.3	117.7	130
B 级		7.68	13.0	17.7	22.3	26.6	30.9	35.1	39.2	43.3
C 级		2.3	3.89	5.32	6.68	7.99	9.27	10.53	11.77	13.0

表 4.10-4 成功率验证试验方案 ($\beta=0.1$)

A_c n_i								
	1	2	3	4	5	6	7	8
成功率等级								
A	777	1063	1335	1597	1853	2105	2352	2597
B	388	531	667	798	926	1051	1175	1297
C	194	265	333	398	462	525	587	648
D	129	176	221	265	308	349	390	431
E	96	132	166	198	230	262	292	323

4.3 漏电保护器成功率验证试验程序

成功率验证试验按下列程序进行：

- (1) 选定产品的成功率等级。
- (2) 选定允许失效数 A_c 。
- (3) 根据选定的成功率等级和 A_c ，由表 4.10-4 查出作

接收判断时所要求的试验数 n_i 。

- (4) 确定试品数 n 。从样品应具有代表性考虑， n 不宜过小，一般可根据批量数 N 的大小来确定， N 越大， n 也越大，推荐按表 4.10-5 选择。 n 的确定也应考虑产品的价格与总试验时间不致过长这两个因素。

表 4.10-5 推荐的试验样品数 n

批量 N 的大小	1~2	3~8	9~15	16~25	26~50	51~90	91~150	≥ 150
n 的范围	全部	2	2~3	3~5	5~8	5~13	8~20	13~32

- (5) 从批量生产并经过筛选的合格产品中随机抽取 n 个试品, 供抽样的产品数量应不小于试品数 n 的 10 倍。
- (6) 确定试品的试验截止次数 n_z , 即
$$n_z = \frac{n_f}{n} \tag{4.10-1}$$
- (7) 对漏电保护器通以额定剩余不动作电流, 检测漏电保护器是否误动作。
- (8) 对漏电保护器通以额定剩余动作电流, 检测漏电保护器是否在规定时间内动作。
- (9) 操作漏电保护器的试验按钮, 检测漏电保护器是否动作。
- (10) 统计所有试品总的失败次数 r_d 。
- (11) 试验结果判定: 若累积试验次数 n_z 达到或超过了作接收判决时所要求的试验数 n_f , 而总的失败次数 r_d 不超过允许失效数 A_c , 则判为试验合格 (接收); 若累积试验次数 n_z 没有达到 n_f , 而总的失败次数 r_d 超过允许失效数 A_c , 则判为试验不合格 (拒收)。

4.4 漏电保护器失效率验证试验程序

- 失效率验证试验按下列程序进行:
- (1) 选定失效率等级, 首次试验一般应选失效率等级为 C 级或 B 级。
 - (2) 选定允许失效数 A_c , 推荐在 1~5 的范围内选择 A_c , 不推荐选择 $A_c=0$ 。
 - (3) 根据选定的失效率等级和 A_c , 由表 4.10-3 查出试验截尾时间 T_c 。
 - (4) 选定试品的试验截止时间 t_z , 推荐 $t_z=6000$ 次。
 - (5) 根据 T_c, A_c, t_z , 由式 (4.10-2) 确定试品数 n , 即
$$n = \frac{T_c}{t_z} + A_c \tag{4.10-2}$$
 - (6) 从批量生产的合格产品中随机抽取 n 个试品, 供抽样的产品数量应不小于试品数 n 的 10 倍。
 - (7) 按上述可靠性验证试验方法中的规定进行试验与检测。
 - (8) 统计相关失效数 r 及各失效试品的相关试验时间 (失效发生时间), 对试验后检测出的相关失效试品, 其相关试验时间按试验结束时的时间计算。
 - (9) 试验结果判定: 若累积相关试验时间 T 达到或超过了截尾时间 T_c , 而相关失效数 r 未超过允许失效数 A_c , 则判为试验合格 (接收); 若累积相关试验时间 T 未达到截尾时间 T_c , 而相关失效数 r 超过了允许失效数 A_c , 则判为试验不合格 (拒收)。

5 可靠性试验装置

研究低压电器的可靠性, 除了要研究其可靠性指标和试验方案之外, 还需研制出用来贯彻该电器可靠性试验方案的可靠性试验装置。只有这样才能真正地将可靠性研究工作付诸实施。先进而完善的可靠性试验装置是进行产品可靠性验证试验的基础。为了提高可靠性验证试验的效率及正确性, 应根据产品的失效判据及可靠性验证试验方法, 来研制可靠性试验装置。

5.1 试验装置的技术性能

- (1) 具有 8 台固定安装的操作机构, 可对常用型号单极和多极漏电保护器进行失效率验证试验。
- (2) 根据试验的要求, 试验人员可以通过试验装置的软

件对可靠性验证试验所涉及的各个试验参数进行设置和整定, 如操作频率、试验截止次数等参数。

- (3) 失效率验证试验中, 试验装置能同时对 8 台漏电保护器的 32 对触头进行接触压降及断开触头间电压的检测。
- (4) 失效率验证试验中, 试品的操作频率在 10~500 次/h 范围内可调。
- (5) 具有 2 台可移动操作机构, 可对常用型号单极和多极漏电保护器进行成功率验证试验。
- (6) 试验装置可在 0~500mA 范围内产生可调整大小的正弦波试验电流。可对目前主要型号的漏电保护器进行试验。
- (7) 电流 (mA) 输出分为 0~30, 0~50, 0~300, 0~500 多挡输出, 试验装置可根据设定的漏电保护器的试验电流, 自动选择合适的电流挡输出。
- (8) 试验装置具有短路保护功能, 工控机意外故障后, 由电路进行保护, 不会造成相间短路。
- (9) 在成功率验证试验中, 可通过软件选择对多极漏电保护器的任意一极进行通电检测。
- (10) 试验装置能自动记录试验次数, 试品发生失效时, 试验装置可以对失效试品的编号、失效发生的时间及失效模式进行记录, 并整理数据输出。
- (11) 具有完整的数据保护功能, 意外断电后数据不丢失, 电源恢复后不破坏已采集的数据。
- (12) 试验过程中, 试品发生失效, 试验装置可根据输入的控制参数判断试验是否应停止; 试验操作过程由工控机显示器提示进行, 操作简便。

5.2 试验装置的硬件设计

漏电保护器可靠性试验装置主要由试品控制柜、试品柜、调温调湿箱组成。试验装置的原理框图如图 4.10-2 所示。

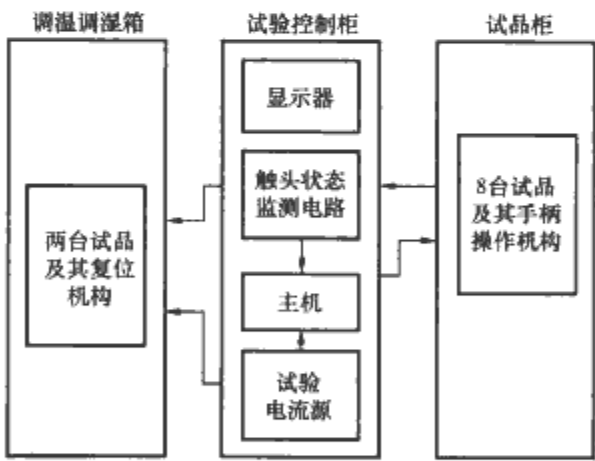


图 4.10-2 漏电保护器可靠性试验装置的原理框图

5.2.1 试验控制柜

试验控制柜由工业 PC 机、触头状态测试卡、试验电流源、输入输出卡 (720 卡)、数据采集卡 (818 卡)、数字电流表和电源开关等组成。触头状态检测卡的主要功能是在被测试品手柄合/分闸到位后, 在合/分闸期间采集被监测试品所有触头的闭合/断开的实际状态, 对其进行辨别比较后将信号电平送至工控机。工控机会根据试品合/分闸状态及所监测触头间的电压状态信息, 来判断试品的工作正常与否。

试验电流源由降压变压器、电动调压器、检测电路组成。它为成功率验证试验提供可调整的试验电流。试验电流源在进行成功率验证试验时, 产生额定剩余动作电流, 检测漏电保护器是否拒动, 以及在通以额定剩余不动作电流时,

检验漏电保护器是否误动。工控机设置试验电流的大小后，调节电动调压器的控制端，产生正弦交流电流作为试验电流，进行漏电保护检测。试验中如发现试品失效，工控机记录失效类型、次数及试品号。

5.2.2 试品柜

试品柜有 8 台固定安装的电动机驱动的机械机构，用来控制试品的分/合闸操作；可同时对 8 台单极或多极漏电保护器进行失效率验证试验；对外形尺寸不同的漏电保护器，只需更换卡具即可进行试验。试验柜另有 2 台可移出式机械机构可放置于调温调湿箱中进行成功率验证试验。

固定安装的机械机构在进行失效率验证试验过程中，由试验装置的电动机构完成漏电保护器的分合操作。试品的手柄分/合闸机构通过工控机控制电动机的正反转来完成试品手柄的分/合闸操作，并在接收手柄合/分闸到位信号后使电机停转，因此可由工控机控制按照设定的操作频率对试品进行合/分闸操作。

2 台可移出式机械机构可进行成功率验证试验，试验过程中，机械机构同试品一起被置于调温调湿箱中经受高温高湿的严酷环境的考验，因而机械机构都经过了防腐防锈处理。试验装置可对两台漏电保护器通以额定剩余不动作电流，检测漏电保护器是否误动；也可通以额定剩余动作电流，检测漏电保护器是否拒动。漏电保护器脱扣后，试验装置可自动对其复位。试验装置可对漏电保护器的试验按钮进行检测。

试验装置可对目前常用型号单极、两极、三极、四极漏电保护器进行试验。对其他不同外形尺寸的漏电保护器可更换卡具后进行试验。

漏电保护器可靠性试验装置还包括漏电保护器的操作手柄、复位按钮、试验按钮三个手动操作部件的自动操作。当漏电电流大于额定剩余动作电流或按下试品的试验按钮后，漏电保护器动作，复位按钮弹出，手柄跳下。试验操作机构可由工控机控制对漏电保护器进行自动复位。复位按钮操作电路框图如图 4.10-3 所示。试验装置定期进行漏电保护器试验按钮的检测，由工控机控制，自动按下试验按钮，检测漏电保护器是否可靠工作。检测试验按钮的机构由螺管电磁铁组成。试验按钮操作电路框图如图 4.10-4 所示。



图 4.10-3 复位按钮操作电路框图

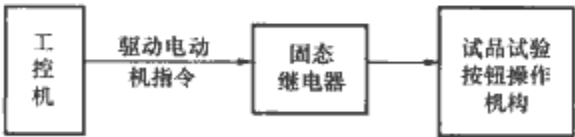


图 4.10-4 试验按钮操作电路框图

5.3 试验装置的软件设计

漏电保护器可靠性验证试验应用软件由 C 语言编制，并同汇编语言的功能结合起来，C 语言可将一个程序划分成不同模块并放入不同文件，分别进行编译，可避免过长的编译时间。

漏电保护器可靠性试验应用软件具有良好的人机对话界面。软件采用模块化的设计方式，即每项功能都是通过一些

比较独立的函数模块来完成的，这样，不仅便于分别使用和软件调试，而且增强了试验运行的可靠性。软件中有针对操作的提示，可方便试验人员对本装置的操作。

试验软件主要包括试验检测、数据查询、数据另存三个模块。数据另存可将试验数据保存在软盘中。数据查询模块将按试验编号进行试验数据的查询。试验检测模块为试验控制、试验数据处理和保存的模块。

试验检测是本软件的关键部分，负责控制整个试验过程中试验装置的自动操作及试验数据的存储显示。它分为试品试验信息、样品安装、失效率验证试验控制程序、成功率验证试验控制程序、试验结果显示五部分。漏电保护器可靠性试验系统软件模块如图 4.10-5 所示。

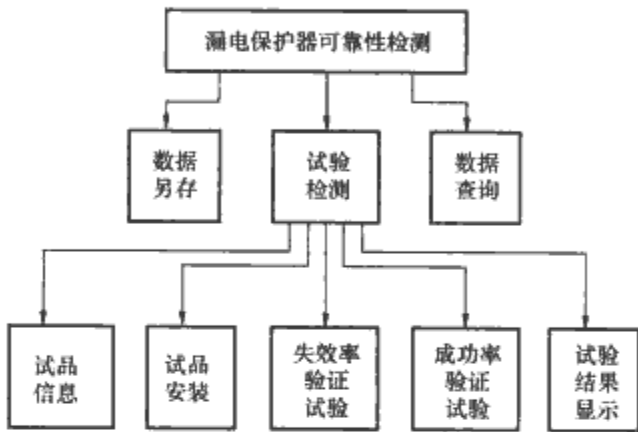


图 4.10-5 漏电保护器可靠性试验系统软件模块

试品试验信息程序中输入试验编号、试品标号、试品生产单位、抽样样本数量、试验人员等试验信息，以及试品的型号规格、额定电压、额定电流等电路参数。试验编号应与试验任务书的试验编号相符，是不同试验的标识。因而把试验编号作为试验数据的保存文件名，用于试验数据的管理和查询。

样品安装模块是为方便调整试品的安装位置及操作机构的操作手柄的位置设计的。不同生产单位生产的或不同型号规格的试品，手柄、复位按钮和试验按钮的操作位置都有所差异。如果试品的安装位置不当，操作机构不能对试品进行正确的操作，则试验结果不能反映试品的真实情况。因而在试品试验前，试品的安装位置及试验机构的操作机构都需要调整到适当的位置。通过样品安装模块，可控制对每个试品的手柄、复位按钮、试验按钮的试验操作手柄进行反复独立的操作，从而方便试验人员调整出试品的适当位置。

失效率验证试验控制程序模块是试验装置进行控制失效率验证试验的软件。在失效率验证试验中，首先设定试验次数、操作频率等试验参数。当选定菜单开始试验后，首先根据试验时间参量设置试验控制时间参数，然后按照设定的操作频率进行合闸/分闸操作，同时进行触头状态的监测，若有失效发生，则记录失效时的全部失效信息。每一个操作循环结束后都要进行失效屏蔽处理，即若试品的触头失效次数超限，将屏蔽该试品，即该样品不再继续试验。若全部试品均失效或已达到总的试验次数，则试验结束。试验过程中也可暂停退出试验。试验软件可自动存储试验数据。失效率验证试验控制程序流程图如图 4.10-6 所示。

成功率验证试验控制程序中，当选定开始试验后，读取试验电流等试验参数，并对试验装置进行初始化。由试验参数软件确定控制端口控制字，以选择适合的硬件电路回路和采样电阻。成功率验证试验中，试品通以额定剩余不动作电流，软件随时检测试品是否有误动作，通以额定剩余动作电

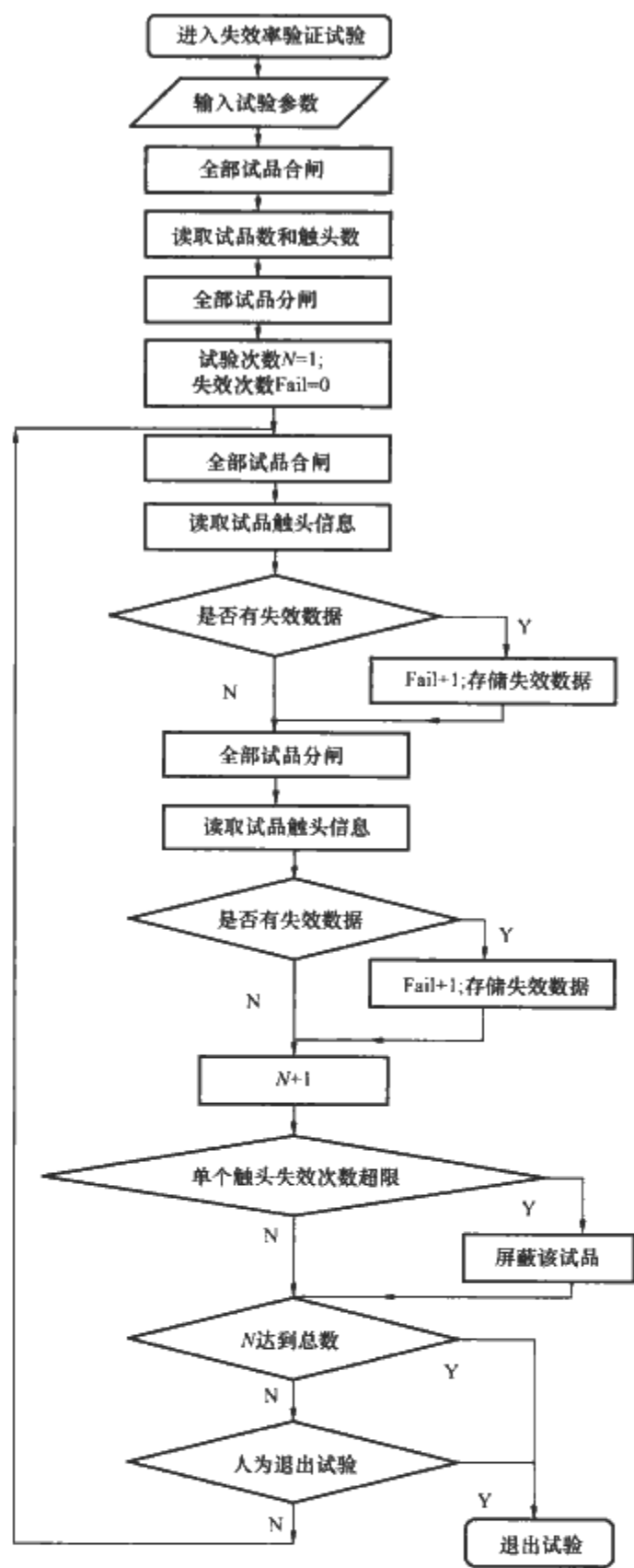


图 4.10-6 失效率验证试验控制程序流程图

流时软件还要检测试品是否有拒动，以及检测试验按钮是否正常工作。试验软件自动控制试验过程，直到试验结束时间到或所有试品的失效次数均超过失效允许次数时试验结束。试验过程中，也可人为干预，终止试验。成功率验证试验控制程序流程图如图 4.10-7 所示。

成功率验证试验控制程序中，通过电动调压器调节电压的升降来调整试验电流，成功率验证试验的试验周期长，电网电压难免会有波动，为保证试验过程中试验电流的稳定性，在整个试验过程中，试验软件随时检测试验电流，如有偏差，及时调整电动调压器调节电压的升降来调整试验电流。试验电流调整程序模块如图 4.10-8 所示。

试验结果显示程序可显示失效率验证试验和成功率验证试验的试验结果。在试验中，软件自动记录显示试验过程中失效试品号、失效类型、失效次数等试验信息，试验完成后，自动进行数据文件存储。通过试验结果显示程序显示本次试验的试验结果及所有试验信息。

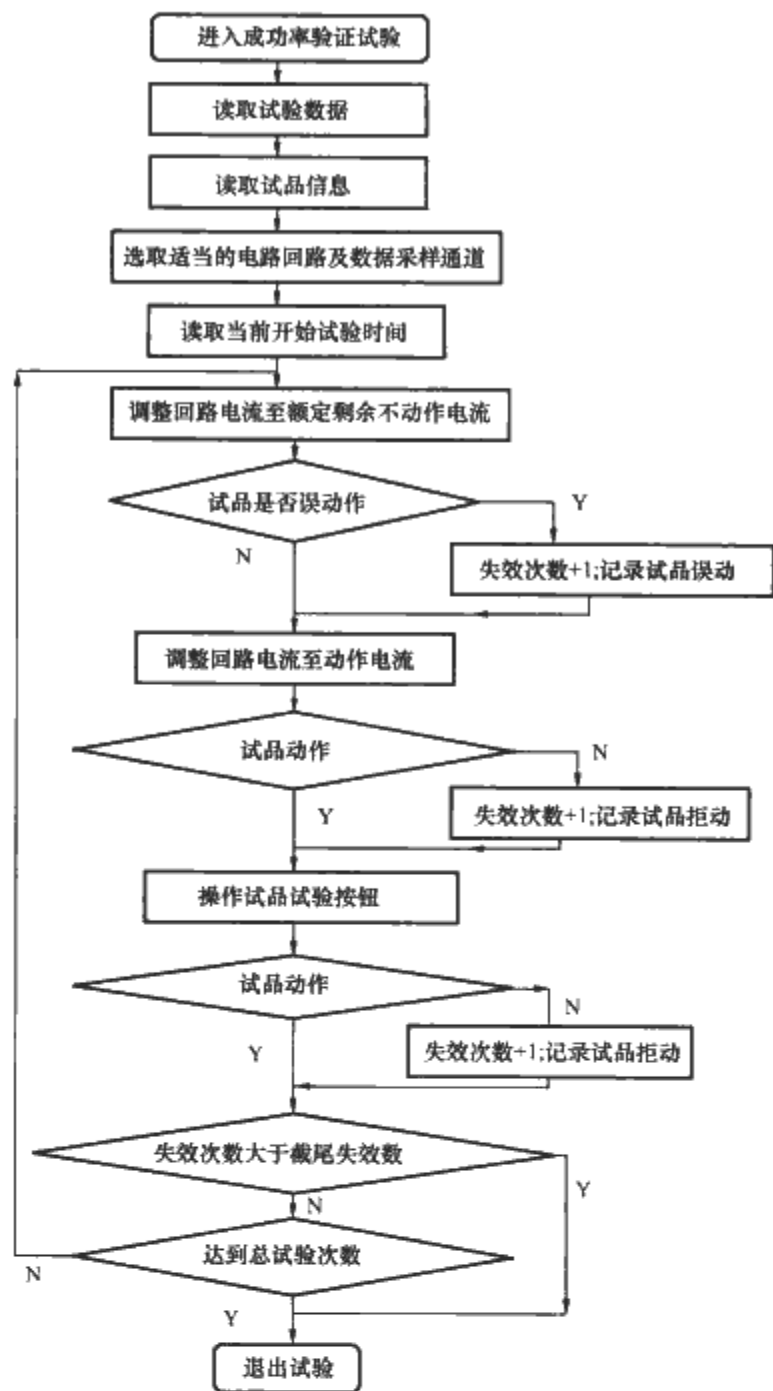


图 4.10-7 成功率验证试验控制程序流程图

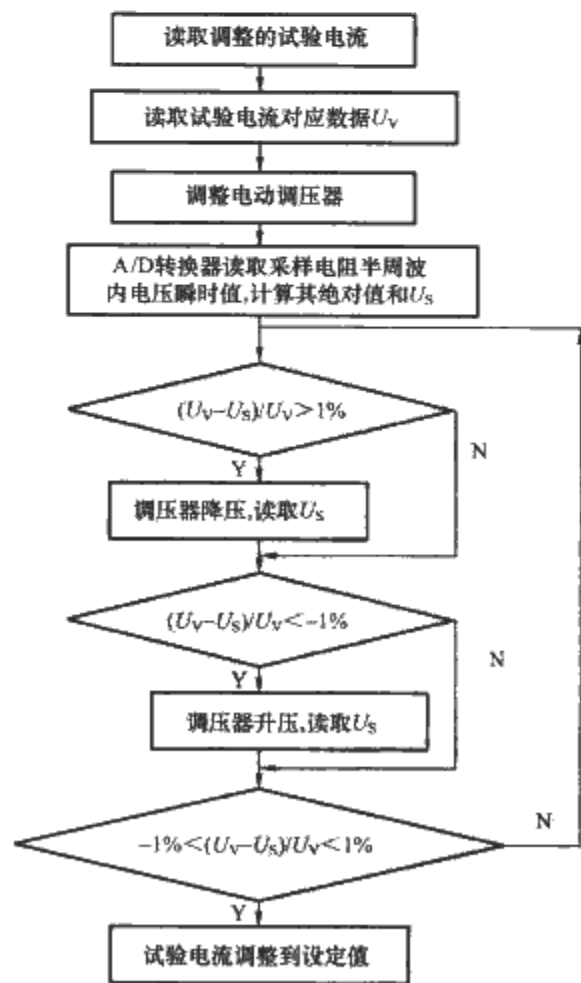


图 4.10-8 试验电流调整程序模块

第 11 章 低压断路器的可靠性指标与考核方法

1 可靠性指标

IEEE 电力系统可靠性委员会低压断路器可靠性工作组对低压断路器开展了可靠性研究,并对低压断路器可靠性进行了调查。调查中脱扣器和脱扣校准故障率最高,为其他故障模式(机械故障,电触头故障)的两倍或更高。

此外,1996 年 CIGRE 第 13SC(开关设备)组成立了一个新的工作小组即 13.08 小组(断路器的寿命管理),来研究断路器寿命管理的情况并就如何延长运行中和改进中的开关设备的剩余预期寿命提出详细的建议。而其研究的内容包括:过去和现在设计的高、中压断路器的现有寿命数据、剩余预期寿命的确定和评估、延长寿命的可能性,以及试验和经济的影响等。

由此可见,国外已对高、低压断路器作了较细致的可靠性调查,并归纳出了主要故障模式。而上述文献中所涉及的可靠性工作特点是主要针对使用中断路器的可靠性,且仅限于总结调查的结果,未作任何结论性评论。关于断路器可靠性验证试验方法,以及断路器的可靠性指标的制定及评估方法等理论研究方面的内容未见相关公开发表的文献。

而我国对断路器的可靠性研究工作起步较晚,于 20 世纪 90 年代初才开始。国内电力部门可靠性管理中心发布了高压断路器 1990~1999 年的事故情况调查及故障统计分析结果。而对低压断路器的可靠性调查工作目前国内还基本上未开展。

通过分析,低压断路器的主要故障模式可分成如下三类:

(1) 操作故障。即低压断路器在接到合闸信号或手动合闸操作时合不上闸,电路不能接通;低压断路器在接到分闸信号或手动分闸操作时分不了闸,电路不能分断。

(2) 误动故障。即当配电电路或用电设备未发生过载、短路故障时,瞬动脱扣器或过载脱扣器动作;或者由于断路器本身动作特性的改变或由于各种干扰信号的作用而使其瞬动脱扣器或延时动作脱扣器动作,从而使断路器自动分闸,导致配电电路不必要的停电。

(3) 拒动故障。即当配电电路或用电设备发生过载、短路等故障时,断路器不能及时、可靠地切断故障电流,使电气线路或用电设备得不到可靠的保护。

根据低压断路器的上述工作特点及故障模式,采用操作失效率等级、保护成功率等级作为其可靠性指标。

2 试验要求

就设备可靠性试验来说,实验室可靠性试验的条件应与已知的使用条件相当,而且应规定和控制维修条件。在选择设备可靠性试验条件时,应考虑如下的因素:

- (1) 要求或进行可靠性试验的基本理由。
- (2) 预期的设备使用条件的变化。
- (3) 使用条件中的不同应力因素引起失效的可能。
- (4) 不同试验条件下相应的试验费用。
- (5) 可供使用的试验设施。

(6) 可利用的试验时间。

(7) 随试验条件变化的预计的可靠性特征量。

如果试验的目的是为了证明设备可靠性不低于某一等级,则试验条件决不能排除任何重要的最严酷的使用条件。而低压断路器可靠性试验中主要的试验条件在参照了 GB 5080.1—1986《设备可靠性试验总要求》、GB 7288.1—1987《设备可靠性试验 推荐的试验条件 室内便携设备一粗模拟》的基础上,主要依据断路器的相关技术标准予以规定。

2.1 环境条件

可靠性试验的试验环境条件应当和产品使用的现场环境条件一致,这样得到的可靠性指标更能反映出批产品在使用中可能表现出来的水平。但是,现场使用的环境条件是一个复杂、多样的条件,可靠性试验中要精确地模拟使用环境,一般在经济上是不可能的,从试验的观点来看也是不重要的。

因此,除非产品标准另有规定,推荐试验应在 GB/T 2421—1999 规定的试验时的标准大气条件下进行,即温度为 15~35℃,相对湿度为 50%~90%,大气压力为 86~106kPa。试品应在试验的标准大气条件中放置足够的时间(不少于 8h),以使试品达到热平衡。此外,试验环境应注意避免灰尘和其他污染。

2.2 安装条件

试验过程中试品的安装应根据其实际使用时的特点。根据技术标准中规定,其安装应遵照以下几项原则:

- (1) 试品应以正常使用方式安装在正常使用位置(试品应完整地安装在其本身的支架上或一个等效的支架上)。
- (2) 试品应安装在无显著冲击和震动的地方。
- (3) 试品安装面与垂直面的倾斜度应符合产品标准的规定。
- (4) 试品应在自由空气中试验。

2.3 电源条件

低压断路器的可靠性试验用电源可分为直流和交流两种。交流试验电源的电源条件可以参考电网电源的条件制订,考核一个正弦交流电源主要有频率偏差和纹波系数两个参数。推荐采用:

- (1) 频率为 50Hz 的正弦交流电源,其频率允许偏差为 $\pm 5\%$ 。
- (2) 直流电源可采用发电机、蓄电池或稳压电源,若试验中不影响产品性能时,可以采用三相全波整流电源,但其纹波系数不大于 5%。

(3) 由于试验电源有一定的内阻,所以在试验过程中,当触头接通或断开负载时会引起负载电流的变化,从而引起加在负载上的电源电压的波动。在监测低压断路器接触可靠性时,如果上述电源电压的波动引起触头接触压降的变化过大,那么就会影响测量的准确性。而测量触头打开状态下其两端的端电压时,测量的准确性也不应受电源电压波动过大

的影响。因此,在试验过程中,当触头接通负载时,试验电源电压的波动相对于空载电压而言应不大于5%。

2.4 负载条件

(1) 负载电源可为直流电源或交流电源,除非产品标准另有规定,否则推荐采用直流电源。

(2) 负载可为阻性负载、感性负载、容性负载或非线性负载,除非产品标准另有规定,推荐采用阻性负载。

(3) 试验时电路电源电压 U 。除非另有规定,否则应采用24V或产品标准中规定的触头最低直流额定电压值。

(4) 除非产品标准另有规定,否则试验时触头电路负载电流 I_c 的数值可采用100mA或1A。

2.5 试验激励条件

进行断路器的瞬动保护可靠性试验时,试验的激励条件为给试品所施加的试验电流值。按照标准规定,在验证低压断路器的瞬动保护特性时,均应从冷态开始,对其分别通以短路整定电流值的80%和120%来验证低压断路器是否发生误动和拒动的故障。

3 试验方法

3.1 试品的准备

试验中所用试品,应该是从在稳定的工艺条件下批量生产出的合格产品中随机抽取的。进行试验时,试品应为新的清洁的状态。

3.2 试品的检测

对低压断路器的试品检测可以分为试验前检测、试验过程中检测两项内容。

在瞬动保护可靠性试验过程中,从冷态开始,对其通以短路整定电流值的120%时,监测试品瞬动脱扣器是否在0.2s内动作(操作10次);待至冷态后,再对其通以短路整定电流值的80%,监测试品的脱扣器是否不动作,瞬动脱扣器的电流持续时间在0.2s内(操作10次)。瞬动保护可靠性试验应分别在操作可靠性试验前后进行。

3.3 失效判据

低压断路器试品的失效判定是在试验过程中的检测项目中进行的。

在瞬动保护可靠性试验中,以下任意一种情况发生时,即认为该次试验失败。

(1) 低压断路器通过短路整定电流值的120%时,试品瞬动脱扣器动作时间大于或等于0.2s。

(2) 低压断路器通过短路整定电流值的80%时,试品瞬动脱扣器的动作时间小于0.2s。

4 可靠性验证试验的抽样方案及试验程序

低压断路器操作失效率验证试验方案及试验程序可参照第9章4.1及4.2,本节仅阐述成功率验证试验的抽样方案及试验程序。

4.1 成功率验证试验方案的选择

低压断路器的成功率验证试验中有两种类型的试验方案可选择,即定时或定数截尾试验方案和截尾序贯试验方案。

4.2 成功率验证试验方案的确定

由第9章表4.9-6列出的四参数 R_0 , R_1 , α , β 条件下的成功率验证试验方案,既保证了使用方利益,也保证了生产方利益。但由这些试验方案作出拒收/接收某批产品所需的试品数都比较大,试验费用因此也比较高,在实际应用中,生产厂家和用户都无法接受。在这种情况下,参照第9章小型断路器的成功率验证试验方案的确定方法,可根据两参数 R_1 、 β 来确定低压断路器成功率验证试验方案,即采用表4.9-7作为低压断路器的成功率验证试验方案。虽然表4.9-6、表4.9-7在形式上相差较大,但它们之间有内在的联系。在表4.9-7中选取一定的 R_1 和 r_{RE} 值时,确定出的验证试验方案和表4.9-6确定出的验证试验方案是一致的。例如:表4.9-6中,由 $R_0=0.99$, $D_R=3.00$, $\beta=0.10$ 所确定的试验方案为 $n_t=308$, $r_{RE}=6(A_c=r_{RE}-1=5)$,其中,可由鉴别比公式计算出对应的 R_1 的值为 $R_1=1-D_R(1-R_0)=1-3.00\times(1-0.99)=0.97$;表4.9-7中,由 $R_1=0.97$, $A_c=5$ 确定的试验方案为 $n_t=308$ 。由此可见,由表4.9-6和表4.9-7所确定的验证试验方案是一致的。此外,虽然表4.9-7是以使用方风险为基础确定的,但选择一定的 A_c 时,也同样可以保证生产方风险。

4.3 试验程序

成功率验证试验是基于假设每次试验在统计意义上来说是独立的基础上的,因此,在相邻两次成功率试验之间,受试品必须恢复到试验开始时同样的状态和性能。同时,在验证产品的成功率时,把受试品每次试验的结果分为“成功”或“失败”两种情形。

成功率验证试验按下列程序进行:

- (1) 选定产品的成功率指标(成功率等级)。
- (2) 选定允许失效数 A_c 。
- (3) 由表4.9-7查出作接收判断时所要求的试验数 n_t 。
- (4) 选定试品的试验截止次数 n_z ,一般 $n_z=10$ 次。
- (5) 根据 n_t , n_z 及 A_c 由式(4.11-1)确定试品数 n ,即

$$n = \frac{n_t}{4n_z} + \frac{A_c}{2} \quad (4.11-1)$$

(6) 从批量生产并经过筛选的合格产品中随机抽取 n 个试品,供抽样的产品数量应不小于试品数 n 的10倍。

(7) 按上述可靠性试验方法中的规定进行试验与检测。

(8) 统计所有试品总的失败次数 r_d ($r_d=r_1+r_2$,式中 r_1 为拒动次数, r_2 为误动次数)。

(9) 试验结果判定:若累积试验次数 n_z 达到或超过了作接收判决时所要求的试验数 n_t ,而总的失败次数 r_d 未达到截尾失效数 r_{RE} (即 $r_d \leq A_c$),则判为试验合格(接收);若累积试验次数 n_z 未达到作接收判决时所要求的试验数 n_t ,而总的失败次数 r_d 达到或超过截尾失效数 r_{RE} (即 $r_d > A_c$),则判为试验不合格(拒收)。

5 可靠性试验装置

5.1 试验装置的技术性能

(1) 具有3个工位的台式试品操作台,能同时对3台试品进行操作可靠性试验。

(2) 根据试验的要求,用户可对试验所涉及的各种参数进行修改整定。

(3) 在操作可靠性试验中,试验装置能同时对每台试品

- 的触头进行接触压降及断开触头间电压的监测。
- (4) 在操作可靠性试验中，操作频率在 10~600 次/h 范围内可调，负载因数可调。
- (5) 在瞬动保护可靠性试验中，试验装置可监测被试品回路中的试验电流值，并能自动进行调节。
- (6) 能自动记录试验次数；试品发生故障时，能自动记录失效试品的编号、失效发生的时间，失效触头的编号及失效类型，并能将故障试品自动切除；试验数据可进行自动处理和打印。
- (7) 可直接驱动试品本身的操作机构，也可用机械手自动拨动手柄操作。

5.2 试验装置的硬件设计

低压断路器可靠性试验装置主要由四部分组成，即控制

柜、试品操作台、大电流柜和负载柜。低压断路器可靠性试验装置总结结构原理框图如图 4.11-1 所示。

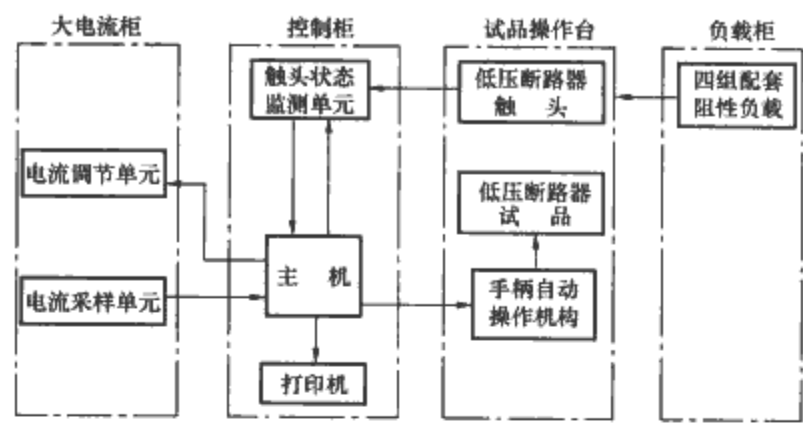


图 4.11-1 低压断路器可靠性试验装置总结结构原理框图

第12章 过载继电器的可靠性指标与考核方法

过载继电器广泛应用于电动机的过载保护。对过载继电器,人们关心的是过载继电器是否能准确可靠地起到保护作用,这里保护作用有两个含义:一个是过载继电器从冷态开始,通以1.05倍整定电流至热态时不发生误动,或从冷态开始,通以7.2倍整定电流时试品在2s内不发生误动;另一个是通以1.2倍整定电流时试品在2h内不发生拒动作,或通以1.5倍整定电流时试品在2min内不发生拒动作,或从冷态开始,通以7.2倍整定电流时试品在2~10s内不发生拒动作。其可靠性考核主要是对它的拒动和误动加以考核。

进行过载继电器的可靠性研究,首先要进行过载继电器的可靠性指标的研究。可靠性指标要全面定量反映过载继电器的可靠性。在完整地反映其可靠性特征的前提下,产品的可靠性指标尽可能少。可靠性指标的制定必须深入地分析过载继电器的工作特点和故障模式。可靠性指标反映使用要求和当前产品的薄弱环节。

1 可靠性指标

过载继电器的技术性能主要是保护性能。过载继电器具有以下两种故障模式:

- (1) 过载继电器不能可靠的动作(拒动)。
- (2) 过载继电器发生误动作(误动)。

考虑到过载继电器作为保护电器的工作特点及其可能发生拒动、误动故障这两类故障的故障模式,针对拒动、误动故障,采用保护成功率 R (简称成功率)的高低作为可靠性指标,保护成功率是指产品在规定条件下完成规定功能的概率,或在规定条件下试验成功的概率。

2 试验要求

过载继电器的保护成功率这个可靠性指标的验证试验中均有两种类型的试验方案可选择,即定时或定数截尾试验方案和截尾序贯试验方案。

定数截尾寿命试验是指寿命试验开始后试品的失效数达到规定的失效数就停止的寿命试验,而定时截尾寿命试验是指寿命试验开始后到规定的试验截止时间(或操作次数)就停止的寿命试验。定时或定数截尾试验方案的基本思想是在试验期间,对受试产品进行监测,观察累积的试验时间达到了规定的试验时间时的失效数是否符合规定的要求。若失效数未超过预定的允许失效数,则说明产品符合规定的要求,认为产品可靠性达到规定要求,判为接收;若累积的试验时间未达到预定的试验时间,而失效数超过了预定的允许失效数,则认为产品可靠性未达到规定要求,判为拒收。

截尾序贯试验方案的核心思想则是在试验期间,观察故障(或失效)出现时对应的累积相关试验时间。如累积相关试验时间足够长,则可判为接收;如果相当短,则判为拒收;如介于两者之间,则不能作判断,需继续试验。所以,序贯试验可充分利用每一次失效发生时所提供的信息,从而有可能减少试品数和试验时间。

目前,过载继电器的年生产量已达到了数千万台,产品

的价格不太贵,所以,建议在过载继电器的成功率验证试验中采用定时或定数截尾试验方案进行考核。

2.1 环境条件

试验按GB 2421—1999《电工电子产品环境试验 第1部分:总则》中规定的标准大气条件进行:温度为15~25℃;相对湿度为45%~75%;大气压力为86~106kPa。

试品应在标准大气条件中放置足够长的时间(不少于8h),以使试品达到热平衡。

2.2 安装条件

- (1) 试品应按正常使用的位置安装。
- (2) 试品应安装在无显著摇动和冲击振动的地方。
- (3) 试品的安装面与垂直面的倾斜度应符合产品标准的规定。

2.3 电源条件

采用恒流源,频率为50Hz的正弦波电源,电流允许偏差为±5%。

2.4 激励条件

进行过载继电器动作保护可靠性试验时,从冷态开始,对过载继电器通以1.05倍的整定电流至热态,然后升高至1.2倍或1.5倍的整定电流,或从冷态开始,对过载继电器通以7.2倍的整定电流。

3 试验方法

3.1 试验内容

(1) 正常工作电流试验。起始条件为冷态时,试品通以1.05倍整定电流,通电时间为2h,试品应不动作。

(2) 1.2倍过载电流试验。在试品发热至稳态的基础上,通以1.2倍整定电流,试品应在产品标准规定的时间内动作。

(3) 1.5倍过载电流试验。在试品发热至稳态的基础上,通以1.5倍整定电流,试品应在产品标准规定的时间内动作。

(4) 7.2倍过载电流试验。起始条件为冷态时,试品通以7.2倍整定电流,试品应在标准规定的脱扣时间范围内动作。

上述四种试验的次数各占试验截止次数 n_z 的1/4。

3.2 试品准备

试品应从稳定的工艺条件下批量生产的合格的产品中随机抽取,供抽样的产品数量应不小于试品数 n 的10倍。

3.3 试验检测

(1) 试验前的检测。试验前先对试品进行检测,检查试品的零部件有无运输引起的损坏、变形、断裂,剔除零部件

损坏的试品，并按规定补足试品数，剔除掉的试品不计入相关失效数 r 内。

(2) 试验过程中检测。试验过程中，从冷态开始，通以 1.05 倍整定电流至热态时，监测试品是否在 2h 内动作，然后升高至 1.2 倍或 1.5 倍整定电流或从冷态开始，通以 7.2 倍整定电流，监测试品是否在规定的脱扣时间范围内动作。试品每次动作后应复位，如果产品具有手动和自动两种复位方式，则每种复位方式的次数各占总复位次数的一半。

3.4 失效判据

(1) 从冷态开始，通以 1.05 倍整定电流至热态时，试品已经动作或从冷态开始；通以 7.2 倍整定电流时，试品在 2s 内已经动作（即发生误动）；通以 1.2 倍整定电流时，试品在 2h 内不动作；通以 1.5 倍整定电流时，试品在 2min 内不动作；通以 7.2 倍整定电流时，试品未在规定脱扣时间范围内动作（即发生拒动）。

(2) 试品动作后，动合触头不能可靠闭合，动断触头不能可靠打开。

4 可靠性验证试验的抽样方案及试验程序

考虑到过载继电器作为保护电器的工作特点及其拒动、误动故障这两类故障，把保护成功率的大小作为过载继电器

的可靠性指标。

推荐过载继电器成功率等级可按不可接收成功率 R_1 的数值分为五个成功率等级（一级、二级、三级、四级、五级）。成功率等级名称和不可接收的成功率 R_1 见表 4.12-1。

表 4.12-1 成功率等级名称和不可接收的成功率 R_1

成功率等级名称	R_1
一级	0.99
二级	0.98
三级	0.97
四级	0.96
五级	0.95

4.1 成功率验证试验方案的确定

成功率是指产品在规定条件下完成规定功能的概率，或在规定条件下试验成功的概率。对过载继电器而言，是指过载继电器在工作期间不发生拒动和误动的概率。

给定 A_c 值，由式（4.9-4）确定出 n 的最小解 n_f (n_f 为作接收判断时所要求的试验数)，即确定出在两参数 R_1 和 β 条件下的成功率验证试验方案，如表 4.12-2 所示。

表 4.12-2 成功率验证试验方案 ($\beta=0.1$)

<div>A_c n_f R_1</div>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.95	77	105	132	158	184	209	234	258	282
0.96	96	132	166	198	230	262	292	323	333
0.97	129	176	221	265	308	349	390	431	471
0.98	194	265	333	398	462	525	587	648	708
0.99	388	531	667	798	926	1051	1175	1297	1418

4.2 试验程序

成功率验证试验方案见表 4.12-2。

试验按下列程序进行：

- (1) 选定产品的成功率指标（成功率等级）。
- (2) 选定 A_c 。

(3) 根据选定的可靠性等级及 A_c ，由表 4.12-2 查出作接收判断时所要求的试验数 n_f 。

(4) 选定试品的试验截止次数 n_z ，推荐 n_z 在 40~80 次中选择。

(5) 根据 n_f ， n_z 及 A_c 由式（4.12-1）确定试品数 n ，即

$$n = \frac{n_f}{n_z} + A_c \tag{4.12-1}$$

(6) 从批量生产并经过筛选的合格产品中随机抽取 n 个试品。

(7) 进行试验与检测，当某台试品的失效次数累计达到 2 次时，该试品应退出试验。

(8) 统计所有试品总的失效次数 r_z ($r_z = r_1 + r_2$ ，式中 r_1 为拒动次数， r_2 为误动次数)。

(9) 试验结果判定：

若累积试验次数 n_z 达到或超过了作接收判断时所要求的试验数 n_f ，而总的失效次数 r_z 未达到截尾失效数 r_c （即

$r_z \leq A_c$ ），则判为试验合格（接收）；若累积试验次数 n_z 未达到作接收判断时所要求的试验数 n_f ，而总的失效次数 n_z 达到或超过截尾失效数 r_c （即 $n_z > A_c$ ），则判为试验不合格（拒收）。

5 可靠性试验装置

过载继电器的可靠性研究包括了过载继电器的可靠性理论及其可靠性指标和试验方案的研究，还包括过载继电器试验装置的研制。先进而完善的可靠性试验装置是进行产品可靠性验证试验的基础。为了提高可靠性验证试验的效率及正确性，应根据产品的失效判据及可靠性验证试验方法，来研制可靠性试验设备。

由于过载继电器的工作原理和可靠性指标体系与一般控制继电器和接触器有很大不同，因此其可靠性试验装置也大不相同。

5.1 试验装置的技术性能

(1) 可对各种过载继电器进行可靠性验证试验，既可以对热继电器也可以对电子式过载保护继电器进行可靠性验证试验。

(2) 根据试验的要求，试验人员可以通过试验装置的软件对可靠性验证试验所涉及的各个试验参数进行设置和整

定,如 1.05 倍额定电流下的试验时间、1.2 倍额定电流下的试验时间等参数。

(3) 在可靠性试验中,可以进行 1.2 倍、1.5 倍、7.2 倍额定电流下动作时间的检测。在 7.2 倍额定电流下的试验是直接从冷态下开始的。1.2 倍及 1.5 倍额定电流下动作时间的检测是:在冷态加 1.05 倍额定电流至热态后开始进行动作时间检测,并判断在从冷态至热态时,是否会误动作。

(4) 试验装置的电流是通过恒流源输出的,最大输出电流为 300A,最小电流为 10A。电流稳定精度高,对干扰的响应时间快,并可以对试验电流进行手动微调。

(5) 试验装置能自动记录试验次数及试品动作时间,并判断试品误动作情况和拒动作情况,可以对试验数据进行查看和打印。

(6) 完整的数据保护功能,意外断电后数据不丢失,电源恢复后不破坏已采集的数据。

(7) 可以进行单台试品试验,也可以对 3 台试品进行试验。

(8) 试验过程中,计算机进行操作提示,减少误操作,并可以随时终止试验。操作简便,人机界面好。

5.2 试验装置的硬件设计

过载继电器可靠性试验装置主要由计算机试验控制柜、恒流源柜组成。试验装置的原理框图如图 4.12-1 所示。

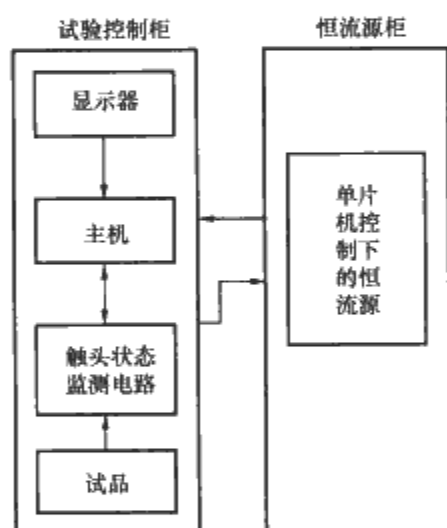


图 4.12-1 过载继电器可靠性试验装置原理框图

5.2.1 试验控制柜

试验控制柜由工业 PC 机、触头状态监测电路、电流回路转换与控制电路、试品连接回路等组成。

工业 PC 机和一般的商业 PC 机有相同的功能,使用方法和软件开发环境相同。但工业 PC 机的机箱的正压风冷设计,可以有效地防止温度过高。工业 PC 机具有空气过滤器和软盘驱动器的封闭门,可以有效地防止粉尘进入。减振压条和缓冲托架使工业 PC 机可以抗冲击和震动。全钢的封闭外壳可防止电磁干扰。不同于一般商业 PC 机的大底板的系统主板结构,工业 PC 机采用模块化结构,为无源母板,CPU 卡取代系统主板,且具有多个扩展槽,便于硬件的开发。考虑到工业 PC 机以上特点,采用工业 PC 机作为过载继电器可靠性试验装置的主机。

触头状态监测电路的主要功能是判断过载继电器触头的状态,即用于检测过载继电器在试验电流情况下的动作情况。该电路通过光电隔离后,将信号电平送至工控机。

电流回路转换与控制回路主要由 8 台接触器和 8 只固态继电器组成。其中,2 台接触器用于切换恒流源电路,其余 6 台用来切换 3 台试品回路,每 2 台接触器控制一个试品的

试验,因此可以进行单台试品的试验,也可以 3 台试品同时进行试验。

试验装置上有 6 个接线端子,上下 2 个端子之间可以连接 1 台试品,过载继电器各极之间应串联连接。

5.2.2 恒流源柜

恒流源柜是由单片机单独控制的电源柜,其输出电流为 10~300A,功率为 2.7kW。电流源有两个输出回路,即 50A 和 300A 输出回路。

50A 输出回路最高输出电压可达 24V,300A 输出回路最高输出电压可达 9V。

5.3 试验装置的软件设计

过载继电器可靠性验证试验应用软件由 QB 语言编制。作为高级语言,提供了和硬件连接的接口命令,因此既可以实现硬件的直接控制,又可以方便地编制比较复杂的人机界面程序。

控制软件采用模块化的设计方式,即每项功能都是通过一些比较独立的函数模块来完成,这样,不仅便于分别使用和软件调试,而且增强了试验运行的可靠性。软件中有针对操作的提示,具有良好的人机对话界面,可方便试验人员对本装置的操作。

试验软件主要包括试验运行、数据显示、数据存取、试验参数修改四个主要模块。数据显示功能主要是方便用户随时查看试验结果,了解每台试品的试验情况。数据存取模块可以将试验结果另存为其他文件,以便用户长期保存试验结果。在进行新的试验时,也需要将原来的试验数据另行保存。原来的数据文件也可以装入计算机,用于用户查看或打印。试验参数修改功能主要用于用户修改主要试验参数,不同试品的试验参数可能不同,该功能为用户提供了修改试验参数的功能。

试验运行是软件的关键部分,负责控制整个试验过程中试验装置的自动操作以及试验数据的存储。

试验运行主要包括三个试验,即 1.2 倍额定电流下过载继电器的可靠性试验、1.5 倍额定电流下过载继电器的可靠性试验、7.2 倍额定电流下过载继电器的可靠性试验。

在 1.2 倍和 1.5 倍额定电流下,过载继电器的可靠性试验是从冷态开始加 1.05 倍额定电流至热态,然后再通相应的试验电流。在试验中,计算机自动监测过载继电器是否动作。在从冷态开始加 1.05 倍额定电流至热态过程中试品不动作,最后试验记录为“过载前状态”为“热态”,并在加热时间到达规定时间后,开始进行 1.2 倍和 1.5 倍额定电流下过载继电器的可靠性试验,并记录试验过程中试品动作情况,如果在规定的时间内试品未动作,试验时间记录为负值,表示试品未动作;在从冷态开始加 1.05 倍额定电流至热态过程中试品误动作,最后试验记录为“过载前状态”为“动作”,且试验自动退出,不再进行过载试验。

在 7.2 倍额定电流下,过载继电器的可靠性试验是从冷态开始的。7.2 倍额定电流下,过载继电器动作时间为一个时间范围,有上限和下限。在试验过程中,计算机自动监测过载继电器是否动作。在试验过程中记录试品动作情况,如果在规定的时间内上限内试品未动作,试验时间记录为负值,表示试品未动作;在规定的时间内下限内试品误动作,最后试验记录为“过载前状态”为“动作”;动作时间大于规定的时间下限,则最后试验记录为“过载前状态”为“冷态”。

在试验过程中,可以随时退出试验,也可以随时跳过试验,进行下一步试验。

第 13 章 低压成套开关设备与控制设备可靠性指标与分析

按城市电网规划导则，城市电网中有送电网、高压配电网、中压配电网和低压配电网，低压成套设备在低压配电系统中是负责完成电能控制、保护、转换和分配的设备。低压成套设备应满足几乎所有的一般性环境工矿条件，凡是用到电气设备的地方都需配备低压成套设备。我国电能的近 80% 都是通过低压成套设备输出而消耗的。

我国现有各类低压成套设备企业 2000 多家，生产的产品有 600 多个系列，年产值约 120 亿元。随着国外一些大公司在国内建立的独资或合资企业的运营，凭借其国际的知名品牌、先进技术和雄厚的资金，其在我国市场所占比重正逐年加大，国内低压电器产品市场竞争已趋白热化，加之我国已加入 WTO，国外的产品以较优势的性价比对国内市场产生较大的冲击力，因此低压成套设备的发展一定会走向国际化，而我国的低压成套设备的生产技术水平与国外同类产品相比有较大的差距，其中可靠性较低是一个至关重要的原因。因此提高国内低压成套设备的可靠性及性能指标是我国电器行业的当务之急。

现代低压成套开关装置与计算机技术、自动控制技术、传感器技术、通信技术、电力电子技术、抗干扰技术等的发展密切相关。低压成套设备的可靠性问题的研究涉及电器、计算机、应用数学等多学科，目前该问题的研究处于国际前沿，国内外可借鉴的文献很少。从国外来看，只有 500kV 的全封闭组合电器进行了可靠性试验，如开断电流试验、机械寿命试验、机械操作试验和环境试验等。从国内来看，电器设备中只有励磁装置的可靠性进行过初步研究。作为低压成套设备的可靠性工作的起步，首先抓住可靠性指标这一关键，提出低压成套设备的可靠性指标体系及其预计方法。众所周知，世界上可靠性指标一直是产品参与市场竞争的有力武器，也是控制、监督产品质量的重要手段。制定出可靠性指标，将其列为产品质量标准的重要内容，以此带动可靠性设计、可靠性管理、可靠性试验等一系列可靠性技术工作的全面开展，以促进我国低压成套设备的可靠性水平的不断增长。

1 低压成套开关设备与控制设备的可靠性指标体系

1.1 层次分析法

层次分析法（Analytic Hierarchy Process, AHP）是对一些较为复杂、较为模糊的问题做出决策的简易方法，它特别适用于那些难于完全定量分析的问题。它是美国运筹学家 T. L. Saaty 教授于 20 世纪 70 年代初期提出的一种简便、灵活而又实用的多准则决策方法。层次分析法将人们的思维过程层次化，逐层比较其间的相关因素，并逐层检验比较结果是否合理，从而为决策分析提供较具有说服力的定量依据。

应用层次分析法（AHP）分析决策问题时，首先要把问题条理化、层次化，构造出一个有层次的结构模型。在这

个模型下，复杂问题被分解为元素的组成部分。这些元素又按其属性及关系形成若干层次。上一层次的因素作为准则对下一层次有关因素起支配作用。这些层次可以分为三类：

（1）最高层。这一层次中只有一个元素，一般它是分析问题的预定目标或理想结果，因此也称为目标层。

（2）中间层。这一层次中包含了为实现目标所涉及的中间环节，它可以由若干个层次组成，包括所需考虑的准则、子准则，因此也称为准则层。

（3）最底层。这一层次包括了为实现目标可供选择的各种措施、决策方案等，因此也称为措施层或方案层。

递阶层次结构中的层次数与问题的复杂程度及需要分析的详尽程度有关，一般底层次数不受限制。每一层次中各元素所支配的元素一般不要超过 9 个。这是因为支配的元素过多会给两两比较判断带来困难。

在确定影响某因素的诸因子在该因素中所占的比重时，遇到的主要困难是这些比重常常不易量化。此外，当影响某因素的因子较多时，直接考虑各因子对该因素有多大程度的影响时，常常会因考虑不周全、顾此失彼而使决策者提出与他实际认为的重要性程度不相一致的数据，甚至有可能提出一组隐含矛盾的数据。设现在要比较 n 个因子 $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ 对某因素 Z 的影响大小，怎样比较才能提供可信的数据呢？可以采取对因子进行两两比较建立成对比较矩阵的办法。首先建立可靠性指标层次结构模型。

1.2 低压成套设备层次结构数学模型

层次结构反映了因素之间的关系，但任意一个因素对总目标评估或者它的上一层因素 Z 的影响有大有小，采用两两比较建立成对比较矩阵的办法，即每次提取两个因素 x_i 和 x_j ，用 a_{ij} 表示 x_i 和 x_j 对 Z 因素的影响大小之比，称 A 为 $Z-X$ 之间的成对比较判断矩阵。容易看出，若 x_i 和 x_j 对 Z 的影响之比为 a_{ij} ，则 x_j 与 x_i 对 Z 的影响之比为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$ 。

低压成套设备属于可修复的电器产品，其可靠性由 7 个可靠性特征量描述（见第 3 章），为了确定它们对低压成套设备的可靠性的贡献，建立低压成套设备可靠性层次结构，如图 4.13-1 所示。

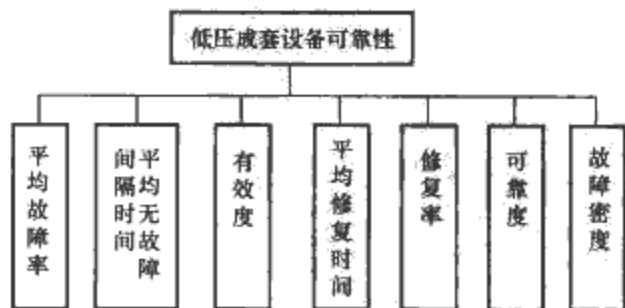


图 4.13-1 低压成套设备可靠性层次结构

关于如何确定它们的值，Saaty 等建议引用数字 1~9 及其倒数作为标度。表 4.13-1 列出了 1~9 标度的含义。

表 4.13-1 层次分析法标度

标 度	含 义
1	表示两个因素相比，具有相同重要性
3	表示两个因素相比，前者比后者稍重要
5	表示两个因素相比，前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比，前者比后者强烈重要
9	表示两个因素相比，前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若因素 i 与因素 j 的重要性之比为 a_{ij} ，那么，因素 j 与因素 i 重要性之比为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

最后，应该指出，一般地作 $n(n-1)/2$ 次两两判断是必要的。有人认为把所有元素都和某个元素比较，即只作 $n-1$ 个比较就可以了。这种做法的弊病在于，任何一个判断的失误均可导致不合理的排序，而个别判断的失误对于难以定量的系统往往是难以避免的。进行 $n(n-1)/2$ 次比较可以提供更多的信息，通过各种不同角度的反复比较，从而导出一个合理的排序。

1.3 构造判断矩阵

设平均无故障时间的权为 W_1 ，平均故障率的权为 W_2 ，有效度的权为 W_3 ，平均修复时间的权为 W_4 ，修复率的权为 W_5 ，可靠度的权为 W_6 ，故障密度的权为 W_7 。建立判断矩阵如下：

$$A = \begin{bmatrix} \frac{W_1}{W_1} & \frac{W_1}{W_2} & \frac{W_1}{W_3} & \frac{W_1}{W_4} & \frac{W_1}{W_5} & \frac{W_1}{W_6} & \frac{W_1}{W_7} \\ \frac{W_2}{W_1} & \frac{W_2}{W_2} & \frac{W_2}{W_3} & \frac{W_2}{W_4} & \frac{W_2}{W_5} & \frac{W_2}{W_6} & \frac{W_2}{W_7} \\ \frac{W_3}{W_1} & \frac{W_3}{W_2} & \frac{W_3}{W_3} & \frac{W_3}{W_4} & \frac{W_3}{W_5} & \frac{W_3}{W_6} & \frac{W_3}{W_7} \\ \frac{W_4}{W_1} & \frac{W_4}{W_2} & \frac{W_4}{W_3} & \frac{W_4}{W_4} & \frac{W_4}{W_5} & \frac{W_4}{W_6} & \frac{W_4}{W_7} \\ \frac{W_5}{W_1} & \frac{W_5}{W_2} & \frac{W_5}{W_3} & \frac{W_5}{W_4} & \frac{W_5}{W_5} & \frac{W_5}{W_6} & \frac{W_5}{W_7} \\ \frac{W_6}{W_1} & \frac{W_6}{W_2} & \frac{W_6}{W_3} & \frac{W_6}{W_4} & \frac{W_6}{W_5} & \frac{W_6}{W_6} & \frac{W_6}{W_7} \\ \frac{W_7}{W_1} & \frac{W_7}{W_2} & \frac{W_7}{W_3} & \frac{W_7}{W_4} & \frac{W_7}{W_5} & \frac{W_7}{W_6} & \frac{W_7}{W_7} \end{bmatrix} \quad (4.13-1)$$

$$\text{即 } A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{4}{3} & 2 & 2 & 4 & \frac{4}{5} & 2 \\ \frac{3}{4} & 1 & \frac{3}{2} & \frac{3}{2} & 3 & \frac{3}{5} & \frac{3}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{2}{3} & 1 & 1 & 2 & \frac{2}{5} & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{2}{3} & 1 & 1 & 2 & \frac{2}{5} & 1 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{2} \\ \frac{5}{4} & \frac{5}{3} & \frac{5}{2} & \frac{5}{2} & 5 & 1 & \frac{5}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{2}{3} & 1 & 1 & 2 & \frac{2}{5} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13-2)$$

每行元素相乘得到

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \\ M_5 \\ M_6 \\ M_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 34.13 \\ 44.56 \\ 0.27 \\ 0.27 \\ 0.002 \\ 162.76 \\ 0.27 \end{bmatrix}$$

求 $W_i = \sqrt[7]{M_i}$ 得

$$W_i = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ W_4 \\ W_5 \\ W_6 \\ W_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.14 \\ 1.76 \\ 0.83 \\ 0.83 \\ 0.412 \\ 2.07 \\ 0.83 \end{bmatrix}$$

用 $\sum_{i=1}^7 W_i = 7.872$ 进行标准化，得

$$W = \begin{bmatrix} 0.21 \\ 0.16 \\ 0.11 \\ 0.11 \\ 0.052 \\ 0.26 \\ 0.11 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 \frac{(AW)_i}{W_i} = 6.96$$

1.4 低压成套设备可靠性指标体系

通过前面的分析可以看出，在低压成套设备的可靠性参数中，可靠度对设备系统的可靠性贡献度为 26%，平均无故障时间对设备系统的可靠性贡献度为 21%，平均故障率对设备系统的可靠性贡献度为 16%，平均修复时间、故障密度和有效度对设备系统的可靠性贡献度都为 11%，修复率对设备系统可靠性的贡献度为 5%。由此可见，低压成套设备的可靠性主要取决于可靠度、平均无故障时间。所以低压成套设备的可靠性指标为可靠度和平均无故障时间。

2 低压成套开关设备与控制设备的故障树分析方法

故障树分析法是由美国贝尔实验室的 H. A. Watson 于 1961 年首先提出的，并应用在民兵导弹的发射控制系统安全性分析中，为预测导弹发射的随机故障率作出了贡献。后来，美国波音公司研制出的 FTA 计算机程序，进一步推动了它的发展。1974 年，美国原子能委员会发表 WASH-1400 关于压水堆事故风险评价的核心方法便是故障树和事件树分析法。1975 年，美国可靠性学术会议把 FTA 技术和可靠性理论并列为两大进展。目前，FTA 已从宇航、核能，进入一般电子、电力、化工、机械、交通乃至土木建筑等领域。科学工作者和工程技术人员愈来愈倾向采用 FTA 作为评价系统可靠性和安全性的手段，采用 FTA 来预测和诊断故障，分析系统的薄弱环节，指导运行和维修，实现系统设计的最优化。在系统设计过程中，通过对可能造成系统失效的各种因素进行分析并绘出相应的故障树，从而确定系统失效原因的各种可能组合方式及其发生的概率，以便计算系统的失效概率，采取相应的纠正措施，提高系统的可靠性。故障树分析法是一种评价复杂系统可靠性与安全性的方法，它是可靠性工程的重要分支，是目前国内外公认的对复杂系统安全性、可靠性分析的一种实用的方法。FTA 方法尤其在大型复杂系统（例如核电站、航天航空系统、导弹、化工系统等）的安全性研究中更为有效，而且其他方法所不可以代替的，因此从 1961 年问世以来得到了很大的发展和应用。

故障树分析法把系统不希望发生的事件（故障状态）作为故障树顶事件，找出导致这一不希望发生事件所有可能发

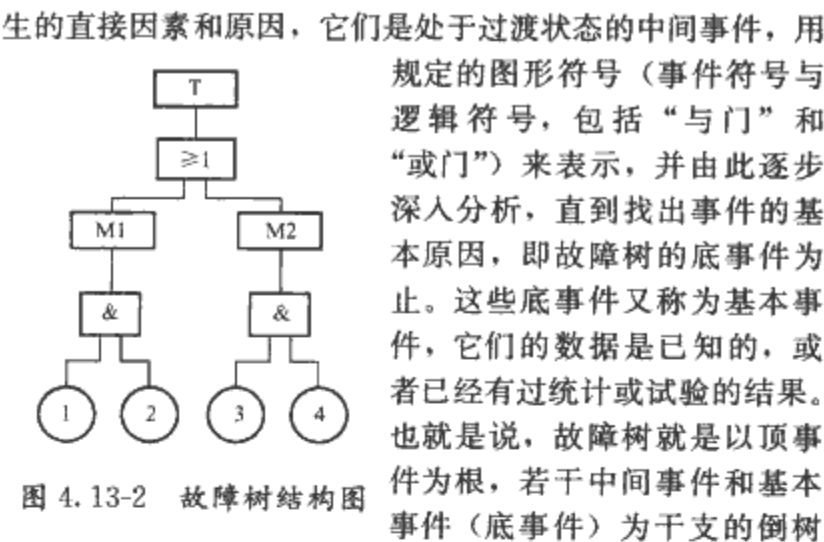


图 4.13-2 故障树结构图

因果逻辑关系图，如图 4.13-2 所示。

故障树分析法的特点是具有很大的灵活性，不局限于对系统可靠性作一般分析，而且可以分析系统的各种故障状态。不仅可以分析某些零部件故障对系统的影响，还可以对导致这些零部件故障的特殊原因进行分析。FTA 分析的过程是对系统深入认识的过程，它要求分析人员要把握系统的内在联系，弄清各种潜在因素对故障发生影响的途径和程度，以便在分析过程中发现并及时解决问题，从而提高系统可靠性。

故障树分析法与传统的框图法相比，更能反映人的系统分析的思维过程，而且可以在故障树分析的过程中，考虑人的影响及环境影响对系统失效的作用。并用图形的方式有层次地分别描述系统在失效的进程中各种中间事件之间的相互关系，并告诉人们系统是通过什么途径而导致失效的。

故障树分析方法的基本步骤为：

- (1) 建造故障树。
- (2) 建立故障树的数学模型。
- (3) 故障树定性分析。
- (4) 故障树定量分析。

顶事件：顶事件就是所分析系统不希望发生的事件，它位于故障树的顶端，因此它总是逻辑门的输出而不可能是任何逻辑门的输入。通常在故障树中顶事件用“矩形”符号表示。

中间事件：除了顶事件外的其他结果事件均属于中间事件，它位于顶事件和底事件之间，它既是某个逻辑门的输出事件，同时又是另一个逻辑门的输入事件。通常在故障树中，中间事件也用“矩形”符号表示。

底事件：位于故障树底部的事件称为底事件，它总是所讨论故障树中某个逻辑门的输入事件，它在故障树中不进一步往下发展。通常在故障树中，底事件用“圆形”符号表示。

基本事件：已经探明或尚未探明但必须进一步探明其发生原因的底事件，基本元部件故障或人为失误、环境因素等均属于基本事件。

除了上述的几种事件之外，还有房形事件、菱形事件、条件事件等事件，由于这些事件在静态故障树中不常用，故在此不作详述。

或门：表示所有输入事件中，至少有一个输入事件发生时，门的输出事件发生。故障树中 n 个底事件由或门相接，则等同于逻辑图中的 n 个单元串联。

与门：表示仅当所有输入事件同时发生，门的输出事件才发生。故障树中 n 个底事件由与门连接，则等同于逻辑图中的 n 个单元并联。

异或门：表示或门中输入事件是互斥的，即当单个输入

事件发生时，其他都不发生，则输出事件才发生。

转移符号：三角符号表示转移事件，故障树中同一故障事件常不在同一位置上出现，三角符号加上相应线条可表示从某处转出或转入，说明在图上不宜直接相连重复的相同的树与树之间的连接关系，也可以表示规模较大树的转页。

除了上述的几种符号之外，还有逻辑禁门、功能触发门、优先与门等用在动态故障树中的符号。

2.1 故障树的建造

故障树建造是 FTA 中最基本、最关键的环节，建树通常是一个反复深入、逐步完善的过程。通过建树过程能使工程技术人员透彻了解系统，发现系统中的薄弱环节，这是建树的首要目的。其次建造故障树也是使用 FTA 的前提条件，因此，故障树建造的好坏直接关系到运用 FTA 的成败。故障树建造的过程，是寻找所研究系统的故障和导致系统故障的诸因素之间逻辑关系的过程，并且用故障树的图形符号（事件符号与逻辑符号）抽象表示实际系统故障和传递的逻辑关系。

2.1.1 建树步骤

建树一般可按以下步骤进行：

(1) 收集并分析有关技术资料。分析人员首先必须熟悉系统，并收集有关系统的技术资料、设计说明书、安全报告、运行规程，以及有关维修、制造等方面的资料，然后对这些资料进行研究，鉴别找出导致系统顶事件的部件，根据故障树分析的广度和深度要求进行建树前的准备。故障树的广度指的是寻找各种功能的相互关系，故障树的深度指的是寻找失效的共性。

(2) 选择顶事件。顶事件是系统最不希望发生的故障状态。它的选取通常需遵循三点：顶事件的发生与否必须有明确定义；顶事件能按逻辑关系进一步分解；顶事件能定量地度量。

(3) 建造故障树。建造故障树实质是找出系统故障和导致故障的诸因素之间的逻辑关系，并将这种关系用特定的图形——故障树表示出来。

(4) 故障树的简化。根据故障树的广度和深度及系统的边界条件，将一些对系统影响不重要的故障事件和重复考虑的故障事件从故障树中删除。

2.1.2 建树方法

建树方法一般可以分为两类：演绎法和计算机辅助法。常见的几种方法有：

(1) 演绎法。演绎法又称为人工建树法，是通过人工分析顶事件的发生原因和过程，由顶事件出发循序渐进地寻找每一层事件发生的所有可能的原因，直到底事件为止。其步骤是：

- 1) 写出顶事件符号，作为第一行。
- 2) 在其下面并行地写出导致顶事件发生的直接原因（包括软硬件故障，环境因素等），作为第二行，把它们用相应的符号表示出来，并用适合的逻辑门和顶事件连接。
- 3) 如果还要分析导致这些故障事件发生的原因，则把导致第二行那些故障事件（称为中间事件）发生的直接原因作为第三行，用适当的逻辑门与第二行的故障事件相连接。
- 4) 按照这种方法步步深入，一直追溯到引起系统发生故障的全部原因，或者其故障机理和概率分布都已知，不需继续分析的底事件为止。

这种方法的优点是整个过程都是人的思考过程，使建树工作者更深入的了解系统。缺点是：费时、费钱，加之人为

的影响因素较大,对含有复杂控制回路的系统,建树有困难。

(2) 合成法。合成法适用于计算机辅助建树,主要是针对系统硬件失效来建造故障树。即通过计算机程序将一些分散的小故障树按一定的分析要求自动地画成分析人员所要求的故障树。其步骤是:

- 1) 根据每个部件的失效模式建立对应的部件失效传递函数。
- 2) 输入系统的原理图和边界条件。
- 3) 根据故障事件的类别,由计算机进行相应的处理:第一类故障事件作为顶事件,第二、三、四类由部件失效传递函数库寻找相应的小故障树。
- 4) 进行编辑,程序输出就是对应的故障树。

合成方法的优点是得到故障树不因人而异,是一种规范化的建树方法。缺点是考虑二次失效和部件有反馈作用的失效事件,不能通过分析系统而彻底地了解系统,也不能有效地考虑环境条件和人为失误的影响。

(3) 决策表法。决策表法利用计算机辅助建树,是在真值表基础上发展而成的。其步骤是:建立部件决策表;简化完全决策表;找出发生顶事件的关键决策表;由关键决策表画出故障树。

其优点是适合于由反馈控制的化工系统或多状态系统故障树的建造。这些故障树一般都属于非单调关联故障树。

2.2 故障树定性分析

故障树定性分析的目的在于寻找导致顶事件发生的原因和原因的组,识别导致顶事件发生的所有模式,它可以判明潜在的故障,以便改进设计,也可以用于故障诊断,改进运行方案和维修方案。也可在定性分析后,找到系统的最小割集,再进行定量分析计算,同时删掉不起作用的割集,提高计算效率。

2.2.1 割集和最小割集

割集是导致故障树顶事件发生的底事件的组合。而最小割集是导致故障树顶事件发生的数目不可再少的底事件的组合。它表示的是引起故障树顶事件发生的一种故障模式。

任何故障树均由有限数目的最小割集组成,它们对给定的故障树顶事件来说是唯一的。单个事件组成的最小割集表示该事件一旦发生顶事件就发生。双重事件组成的最小割集表示这两个事件一起发生才会引起顶事件发生。对 N 个事件组成的最小割集来说,要顶事件发生必须这 N 个事件同时发生。

2.2.2 最小割集的计算方法

最小割集的计算方法很多,常用的有上行法和下行法。

(1) 下行法。Fussell-Vesely 算法(即下行法)的基本原理是故障树中的或门增加割集数目,与门增加割集的容量(割集中包含的底事件的数目)。

从故障树的顶事件开始,由上到下,顺次把上一级事件置换为下一级事件,遇到与门就将输入事件横向并列写出,遇到或门就将输入事件竖向串联写出,直到把全部逻辑门都置换成底事件为止,此时最后一列代表所有割集,再将割集简化、吸收得到全部最小割集。

在故障树最小割集分析程序中,经常采用素数的唯一因子性质对割集进行简化。每个底事件依次对应一个素数,记底事件 X_i 对应的素数 N_i ,则底事件的逻辑积事件 $X_1 X_2 X_3$ 用素数表示为 $N_1 \times N_2 \times N_3$,这样,每个割集对应着一个素数积。把这些素数积由小到大的顺序排列,然后再由小到

大依次进行相除运算,彼此能被整除,则去掉较大的素数,剩下的就是割集对应的素数积(即求得最小割集)。

(2) 上行法。从故障树的最底层开始,利用逻辑与门和或门逻辑运算法则,顺次往上,将中间事件用底事件表示,直到顶事件为止,得到割集,再进行简化、吸收,得到最小割集。

2.2.3 路集和最小路集

路集是故障树中一些底事件的集合,当这些底事件不发生时,顶事件必然不发生。若将路集中所含的底事件任意去掉一个就不再成为路集,这样的路集就是最小路集。每个最小路集代表一种正常工作模式,只要有一个最小路集存在,系统就能正常工作。一旦某底事件发生,控制与该底事件无关的最小路集存在,就能保证系统安全,为控制系统故障,或为已发生故障系统恢复正常提供依据。

把原故障树的与门改为或门,或门改为与门,其他不变,即可得到这颗故障树的对偶树。故障树与其对偶故障树之间相互对偶。对偶故障树具有以下性质:故障树的路集(最小路集)是对偶树的割集(最小割集),反之亦然;故障树的割集(最小割集)是对偶树的路集(最小路集),反之亦然。

利用上面的性质,通过求对偶树的割集与最小割集就可以求得原故障树的路集与最小路集。

2.3 故障树定量计算

故障树定量计算的目的是利用故障树为计算模型,根据底事件发生的概率求顶事件发生的概率和底事件的关键重要度、概率重要度和结构重要度,从而对系统的可靠性、造成损失的严重性、安全性进行风险评估。在进行定量分析之前,要求底事件必须是相互独立的。如果底事件不独立,只能进行变换,使变换成独立的布尔变量。图 4.13-3 为故障树定量计算模块功能图。

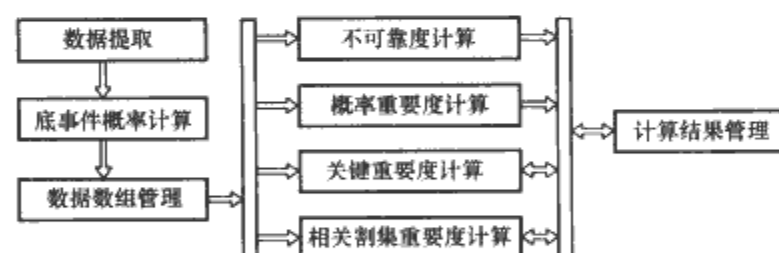


图 4.13-3 故障树定量计算模块功能图

2.3.1 事件与事件积的概率计算

设底事件的发生概率为 $p(x_i) (1 \leq i \leq n)$, 则事件与事件积的概率计算方法如下:

n 个相互独立事件积的概率计算为

$$p(x_1) p(x_2) \cdots p(x_n) = \prod_{i=1}^n p(x_i) \quad (4.13-3)$$

n 个相互独立事件和的概率计算为

$$p(x_1 + x_2 + \cdots + x_n) = 1 - [1 - p(x_1)][1 - p(x_2)] \cdots$$

$$[1 - p(x_n)] = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - p(x_i)] \quad (4.13-4)$$

n 个互斥事件积的概率计算为

$$p(x_1 x_2 \cdots x_n) = 0 \quad (4.13-5)$$

n 个互斥事件和的概率计算为

$$p(x_1 + x_2 + \cdots + x_n) = p(x_1) + p(x_2) + \cdots +$$

$$p(x_n) = \sum_{i=1}^n p(x_i) \quad (4.13-6)$$

n 个相容事件积的概率计算为

$$p(x_1 \cdot x_2 \cdots x_n) = p(x_1)p(x_2 | x_1) \\ p(x_3 | x_1 \cdot x_2) \cdots p(x_n | x_1 \cdot x_2 \cdots x_{n-1}) \quad (4.13-7)$$

式中: $p(x_n | x_1 \cdot x_2 \cdots x_{n-1})$ 为 $(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$ $n-1$ 个事件同时发生条件下, 出现事件 x_n 的条件概率。

n 个相容事件和的概率计算为

$$p(x_1 + x_2 + \cdots + x_n) = \sum_{i=1}^n p(x_i) - \sum_{i < j=2}^n p(x_i x_j) + \\ \sum_{i < j < k=3}^n p(x_i x_j x_k) + \cdots + (-1)^{n-1} p(x_1 x_2 \cdots x_n) \quad (4.13-8)$$

2.3.2 故障树顶事件发生概率

在进行故障树定量计算时, 一般要作以下几个假设: 底事件之间相互独立; 底事件和顶事件只考虑两种状态, 即正常或故障状态。

2.3.2.1 采用最小割集计算顶事件发生概率

设故障树有 k 个最小割集 $k_i (1 \leq i \leq k)$, 故障树的结构函数可以表示为

$$T = \Phi(C) = \bigcup_{j=1}^k k_j = \bigcup_{j=1}^k \bigcap_{i \in D_j} x_i \quad (4.13-9)$$

由式 (4.13-9) 可知, 每个最小割集是底事件的积事件。一般情况下, 最小割集彼此相交, 根据相容事件的概率计算公式, 顶事件发生概率 $P(T)$ (系统的不可靠度 F_s) 为

$$F_s = p(T) = p(k_1 + k_2 + \cdots + k_k) = \sum_{i=1}^k p(k_i) - \\ \sum_{i < j=2}^k p(k_i k_j) + \sum_{i < j < l=3}^k p(k_i k_j k_l) + \cdots + (-1)^{k-1} p(k_1 k_2 \cdots k_k) \quad (4.13-10)$$

式 (4.13-10) 具有 $(2^k - 1)$ 项, 当最小割集数目 k 达到一定程度时, 产生组合爆炸的问题。如某故障树有 40 个最小割集, 则上式有 $2^{40} - 1 = 1.1 \times 10^{12}$ 项, 每一项又是许多事件的连乘积, 计算量很大, 即使使用大型计算机也难以胜任。工程实际应用中, 当基本事件的故障概率很小时 (实际情况经常如此), 通常采用顶事件发生概率的近似计算。令

$$F_1 = \sum_{i=1}^k p(k_i) \\ F_2 = \sum_{i < j=2}^k p(k_i k_j)$$

若割集的数目较少时, 可用上式中前两项的平均值近似的表示, 即

$$F_s = F_1 - F_2 \quad (4.13-11)$$

计算结果精度较高; 当割集的数目较多的时候, 应用区间估计来减少近似结果的误差。

2.3.2.2 采用最小路集计算顶事件发生概率

设故障树有 m 个最小路集 $C_i (1 \leq i \leq m)$, 顶事件的发生为事件 T , 则顶事件的不发生事件的逆事件 \bar{T} 为

$$\bar{T} = \overline{\Phi(X)} = C_1 + C_2 + \cdots + C_m \quad (4.13-12)$$

其中每个最小路集是底事件逆事件的积事件。一般情况下, 最小路集彼此相交, 根据相容事件概率计算公式, 顶事件不发生概率 $P(\bar{T})$ (即系统可靠度 R_s) 为

$$R_s = P(\bar{T}) = P(C_1 + C_2 + \cdots + C_m) = \sum_{i=1}^m P(C_i) - \\ \sum_{i < j=1}^m P(C_i C_j) + \sum_{i < j < k=1}^m P(C_i C_j C_k) + \cdots + (-1)^{m-1} P(C_1 C_2 \cdots C_m) \quad (4.13-13)$$

式 (4.13-13) 具有 $(2^m - 1)$ 项, 每项是许多事件的连

乘积, 当最小路集数目达到一定程度时, 产生组合爆炸的问题。若求得顶事件不发生概率 $P(\bar{T})$, 则顶事件发生概率 $P(T) = 1 - P(\bar{T})$ 。

2.3.3 底事件重要度计算

重要度分析是故障树定量分析中的重要组成部分。重要度是一个部件或者系统的割集发生失效时对顶事件产生的影响程度。它是系统中各单元重要程度的一种度量, 事件的重要度越大, 该事件所处的环节越薄弱, 它在系统中的地位也越重要。底事件重要度在改善系统的设计、确定系统需要监控的关键部位、确定系统故障诊断方法方面都有重要作用。不同的部件可以有多种失效模式, 在故障树中, 每一种失效模式对应一个基本事件。这里所介绍的重要度定义和计算方法均是基本事件重要度的定义和计算方法, 部件重要度应等于它所包括的基本事件重要度的和, 当部件只有一种失效模式时, 部件重要度定义基本事件重要度。为简单起见, 假设部件只含一种失效模式。

在 n 个部件两态系统中, 系统可能状态数为 2^n , 这 2^n 个状态分属于系统正常和系统故障两种状态, 在这 2^n 个状态中只有某些特殊状态的改变才能直接引起系统状态的改变, 即当且仅当某一元部件状态改变才导致系统状态改变, 就称系统处于一种临界状态, 而那些当且仅当该元部件状态发生变化即导致系统状态变化的元部件, 就称为该临界状态下的关键元部件。

2.3.3.1 概率重要度

若系统由 n 个元部件组成, 已知元部件 i 的故障概率为 $F_i(t)$, 系统各单元间的结构关系用可靠性模型 $F_s(t) = F_s\{F_i(t), i = 1, 2, \dots, n\}$ 表示, 则第 i 个底事件的概率重要度定义为

$$I_p(t) = \frac{\partial F_s(t)}{\partial F_i(t)} = F_s\{1, F(t)\} - F_s\{0, F(t)\} \quad (4.13-14)$$

式中: $F(t)$ 为除 i 个元部件以外各部件的故障概率。

概率重要度的数学含义是由于第 i 个元部件的变化使系统顶事件概率发生的变化率, 即第 i 个元部件状态取值为 1 时, 顶事件的概率值和第 i 个元部件状态取 0 值时顶事件概率的差。联系到临界状态的定义, 又可以说, 其物理意义是系统处于元部件 i 为临界状态的概率。故障概率重要度的计算有利于确定提高系统的可靠性应从哪些元部件入手, 对系统的改善有很大的好处。

2.3.3.2 结构重要度

在 n 个元部件组成的系统中, 元部件与系统间的关系用结构函数 $\phi(x)$ 表示, 设系统的任一元部件 i 正常时系统正常, 元部件 i 故障时系统故障, 即满足 $\phi(0_i, X) = 0$, $\phi(1_i, X) = 1$ 或 $\phi(1_i, X) - \phi(0_i, X) = 1$, 则称 (i, X) 为元部件的关键割向量, 用 $n_\phi(i)$ 表示元部件 i 的关键向量总数, 而 i 从正常变到故障状态, 剩下 $n-1$ 个元部件共有 2^{n-1} 种可能的情况, 因此元部件 i 的结构重要度定义为

$$I_\phi(i) = \frac{1}{2^{n-1}} n_\phi(i) \quad (4.13-15)$$

从上面表达式可以看出结构重要度的计算是以假设元部件的故障概率相同作为基础的, 因而它是概率重要度的一种特殊条件下的结果, 在其计算时也可以通过式 (4.3-16) 进行简化计算

$$I_\phi(i) = \frac{\partial F_s(t)}{\partial F_i(t)} \bigg|_{F_1 = F_2 = \cdots = F_n = 0.5} \quad (4.13-16)$$

由上述两种方法计算出的重要度完全由故障树的结构所决定,与元部件的故障概率大小无关。结构重要度是根据系统的拓扑结构来进行重要度计算的,因此可以用于在不知道元部件概率的系统设计阶段,按结构重要度大小分配可靠性指标。

2.3.3.3 关键重要度

关键重要度是底事件*i*故障概率的变化率与它引起顶事件发生概率变化率之比,其定义为

$$I_i(t) = \frac{\partial F_s(t)}{\partial F_i(t)} \times \frac{F_i(t)}{F_s(t)} \quad (4.13-17)$$

从式(4.13-17)可以看出,关键重要度不仅反映了底事件发生概率变化对顶事件发生概率变化的影响,同时也反映了底事件发生概率大小对顶事件发生概率变化的影响,比概率重要度反映的内容更多、更全面。

2.4 故障树分析软件

由于对低压成套设备可靠性要求越来越高,所分析的系统复杂性加大,同时系统所含的部件也大量增加,故障树可靠性分析方法在系统分析中起着越来越重要的作用,手工计算已经不能很好胜任,必须编制相应的计算机辅助程序进行分析,由计算机进行辅助分析计算。

2.4.1 VC开发环境

Visual C++6.0是Microsoft公司的VC++系列产品中一个比较新的版本,提供了一个由许多组件组成的C++开发环境。Microsoft Develop Studio集成开发环境IDE(Integrated Development Environment)是Visual C++的一个重要组成部分,用户通过这一环境与C++项目进行交互,它包括源程序的创建资源、编辑、编译、连接、调试,以及其他有用的特性。MFC(Microsoft Foundation Class)微软基础类库提供了如字符串、链表、数组、文件收集等Windows编程常用的类,它还提供了包括通用Windows API(应用程序接口)和数据结构的类,这些数据结构包括窗口、控件和设备环境。除此之外,MFC还提供了应用程序框架,包括组成应用程序继承结构的类。利用MFC进行Windows编程与传统的Windows编程相比,可以大大减轻编程者的工作量。

2.4.2 统一建模语言UML概述

软件的生产研制过程要经过需求分析、设计、编码等阶段,软件研发的方法可以是结构化的方法,也可以是面向对象的方法。不管采用哪种方法,软件的研发都要产生相应的文档来表达分析设计的结果。UML(Unified Modeling Language)统一建模语言的产生很好地解决了这个问题。UML是一套表示法系统,它已经成为系统开发领域中的标准。UML是由Grady Booch、James Rumbaugh和Ivar Jacobson发明的。它是由一组图组成,使得系统分析员可以利用这一标准来建立能够为客户、程序员,以及任何参与开发过程人员理解的多视角系统蓝图。

2.4.3 故障树的存储

2.4.3.1 二叉树的定义

二叉树的定义是以递归形式给出的。

一棵二叉树是节点的一个有限结合,该集合或者为空,或者是一个根节点加上两棵分别称为左子树和右子树互不相交的二叉树组成。二叉树的形态如图4.13-4所示。

上述节点分别表示:一棵空的二叉树,一个节点也没有;只有根节点的二叉树,根的左子树和右子树都是空的;根的右子树为空的二叉树;根的左子树为空的二叉树;根的两棵子树都不为空的二叉树。

2.4.3.2 二叉树的表示

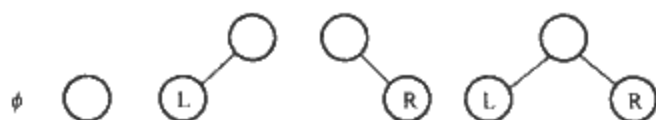


图4.13-4 二叉树的形态

存在两种实现二叉树抽象数据类型的存储表示:数组方式和链表方式。

(1) 数组表示。将一棵二叉树存放在一个向量中。为了能够简单地找到某一个节点的上下左右的关系,也必须对二叉树的节点进行编号,然后按其编号将它放到向量中去。

在编号时,如遇到空子树,应在编号时假定有此子树进行编号,而在顺序存储时当作有子树那样把位置留出来。这样才能反映二叉树节点之间的相互关系,由其存储位置找到它的双亲、子女、兄弟节点的位置,但这样做有可能会消耗大量的存储空间。

(2) 链表存储表示。数组表示法用于完全二叉树的存储表示非常有效,但表示一般二叉树则不很理想。此外,在一棵树中进行插入和删除时,为了反映节点层次的变动,可能需要移动许多节点,降低了算法效率,而使用链表表示,可以克服这些缺点。

根据二叉树定义,可以设计出二叉树节点的构造。二叉树的每一个节点至少应当包含三个域:数据data、左子树节点指针m_pLeft和右子树节点指针m_pRight。这种链表结构称为二叉链表,使用这种结构,可以方便地根据节点m_pLeft指针和m_pRight指针找到它的左孩子和右孩子,但要找到节点的双亲很困难。为了便于查找任一节点的双亲节点,可以在节点中再增加一个双亲指针m_pParent,称为三叉链表。整个链表有个表头指针,指向树的根节点(故障树的头节点),作用是当作树的访问点。

用链表表示一棵树,便于插入、删除、修改和访问。因为数据不需要移动,只需修改指针,所以可以提高效率。

2.4.3.3 二叉树的遍历

二叉树的遍历就是遵从某种次序,遍历二叉树中的多个节点,使得每个节点被访问一次,而且只访问一次。“访问”就是对节点施行某些操作,例如输出节点的信息、修改节点的数据值等,但要求这种访问不破坏它原来的数据结构。

因为二叉树是一种非线性结构,每个节点可能不止一个直接后继,这样必须规定遍历的规则。按此规则遍历二叉树,最后得到二叉树节点的一个线性序列。

基于二叉树的递归定义,可以得到不同次序遍历二叉树的递归算法。

(1) 先序遍历。先序遍历二叉树算法描述:若二叉树为空,则空操作。否则,访问根节点;先序遍历左子树;先序遍历右子树。

(2) 中序遍历。中序遍历二叉树算法描述:若二叉树为空,则空操作。否则,中序遍历左子树;访问根节点;中序遍历右子树。

(3) 后序遍历。后序遍历二叉树的算法描述:若二叉树为空,则空操作。否则,后序遍历左子树;后序遍历右子树;访问根节点。

在递归执行过程中,先序遍历的情形是每进入一层递归调用时先访问根节点,再依次向它的左、右子树递归调用。中序遍历的情形是从左子树递归调用退出时访问根节点,然后向它的右子树递归调用。后序遍历时,从其左、右子树递归调用退出时访问根节点。

通过遍历可以方便地插入、删除和查找任一节点，可以查找任一节点的双亲节点及孩子节点。

2.4.3.4 故障树保存

可实现三种方式对故障树的保存，一是把数据保存为只有本软件识别的二进制文件；二是把故障树数据保存为文本文件；三是把故障树图形保存为位图。

把故障树数据保存为特定格式的二进制文件采用了序列化的方法，序列化实际上就是让对象可以持续，当程序退出时它们就可以被存盘，当程序重新启动时可以被恢复。对象的这种存盘和恢复的过程称为“序列化”。MFC 提供了两种文件操作的方法，一是直接使用 CFile 类的方法，二是使用 CArchive 类的方法。MFC 中提供了 CFile 类来表示磁盘文件，程序可以通过这个类进行文件的读写操作，不过 MFC 提供的序列化机制可以避免直接与磁盘打交道，它在序列化函数和 CFile 类对象之间加入了一个 CArchive 桥梁。CArchive 对象为 CFile 对象缓存数据，同时它还保存了一个内部标记，用来表示是存入还是载入。下面为类序列化的步骤：

- (1) 从 CObject 或其派生类派生出自己的类，也就是序列化的类。
- (2) 重载 Serialize () 函数，加入必要的代码，用以保存对象的数据成员到 CArchive 对象，以及从 CArchive 对象中载入对象的数据成员状态。
- (3) 在类声明文件中，加入 DECLARE_SERIAL 宏。编译时，编译器将扩充该宏，这是序列化对象所必须的。
- (4) 定义一个不带参数的构造函数。
- (5) 在文件加入 IMPLEMENT_SERIAL 宏。

按上面步骤为了保存故障树节点的数据，从 CObject 类派生了 CSaveNode 类来实现序列化。

对于程序中大部分数据的存储都是通过二维数组来实现的。在这里采用了链表来实现，即同时建立两个链表 CHList 和 CVList，其中 CHList 的数据成员为 CVList 的对象指针，而 CVList 的数据成员为故障树节点对象指针，并且它们都是指向下一个节点的指针，这样就用两个链表模拟了二维数组，并且每列的数据元素的个数可以不同，这样当故障树很大的时候就会节省内存空间。链表结构如图 4.13-5 所示。

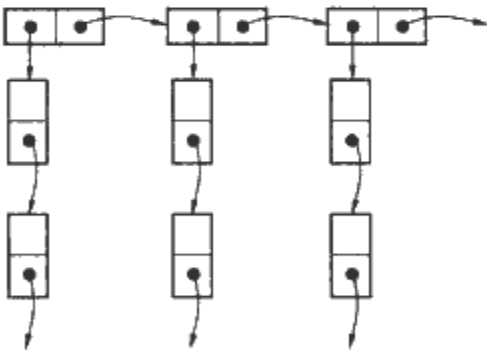


图 4.13-5 链表结构

2.4.4 低压成套设备故障树分析软件的实现

计算机辅助故障树分析系统利用计算机辅助故障树的绘制和分析，借助计算机运算速度快、功能强大的优势，提高故障树分析过程的效率，减少人为因素对分析结果造成的影响。可使用面向对象计算机语言 Microsoft Visual C++6.0 开发，系统结构如图 4.13-6 所示。

图 4.13-6 中箭头方向表明了系统中数据流的方向。故障树定量分析模块中最小化割集及其不交化结果来源于故障树定性分析模块，各底事件概率来源于故障树绘制及参数录入模块。由数据管理模块进行组织后操作，计算结果交数据管理模块处理。

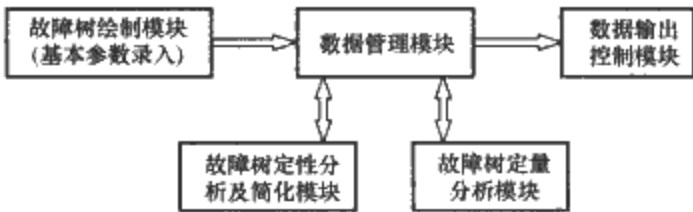


图 4.13-6 系统结构

设计故障树分析软件在图形界面下实现故障树的自动建造，同时能够进行故障树的定性和定量分析。主要任务是如何将用户为给定的系统建好的故障树输入到计算机，并且在计算机屏幕上美观紧凑地显示出来，同时对已经输入到计算机的故障树还能进行编辑，如删除、修改、粘贴、复制等操作，并且能够进行定量和定性分析。主要包括建树模块、视图模块、编辑模块、转移事件模块、保存模块、定性分析模块、定量分析模块。

程序运行过程如图 4.13-7 所示。

开始											
程序界面											
选择命令按钮或菜单											
建树	视图操作				编辑操作				特殊处理		
	放大	缩小	全屏	复原	Undo/Redo	复制	剪切	粘贴	删除	转移事件处理	属性修改处理
显示故障树(图形或树控件)											
保存故障树											
结束											
退出系统											

图 4.13-7 程序运行过程

2.4.4.1 故障树数据结构的确立

故障树是一种特殊的倒立树状逻辑因果关系图，它用事件符号，逻辑门符号和转移符号描述各种事件之间的因果关系。因此，图和树数据结构都可以实现故障树，为了能形象地表示故障树，采用树的数据结构来构造故障树，同时也是为了以后在进行算法设计时的方便。把故障树的事件作为数据结构中的一个节点，而把与它们相连的逻辑门作为一个属性，这样在绘制图形时把事件和逻辑门同时进行绘制。为了支持建造大型的故障树，提供对转移事件的支持，因此把故障树分为许多子树和一个主树，同时建立一个子树和转移事件的映射关系（每个转移事件对应一个子树）。为了很好地表示故障树，故采用二叉树的数据结构在计算机中存储故障树，每个事件作为二叉树中的节点，二叉树的左孩子表示故障树的此节点的孩子节点，而右孩子表示此节点的兄弟节点。同时，为了方便对故障树中每个节点进行方便的操作，还建立了用数组来保存当前故障树所有的节点的指针。

2.4.4.2 故障树的绘制和建造实现

在计算机中绘制故障树，希望计算机将建好的故障树绘制出来，必须告诉计算机下述具体的信息：确定共有几个逻辑门；确定每个逻辑门是何种门；确定每个逻辑门的输入事件数；确定每个逻辑门的输入代号。

当前计算机建造故障树有两种方法，一是分层建树的思想，二是动态建树的思想。

(1) 分层建树的思想。故障树分析是从顶事件开始，然后找出那些能直接促成顶事件出现的因素，层层深入，一直追溯到那些原始的、其失效机理和概率分布都是已知的、不需要再继续分析的因素即底事件时为止。这样，可以把每一棵故障树看成是一层一层衔接而成的，最上层为顶事件，最下层为只有底事件的一层。

对于每一层，所需的信息只是事件的个数和各个事件与下一层事件的逻辑关系，层与层之间的关系可用这种逻辑关系和各事件的分支数来描述，上一层各事件分支数之和就是下一层的事件总数。这样就可以把一棵故障树以层为单位，采用分层的思想，用各层事件名称和各事件分支数来完整描述。

基于以上的分层建树的思想，采用数组的方法来描述故障树的所有信息（包括每层本身的信息及层与层之间的衔接信息）。

(2) 动态建树的思想。动态建造故障树采用的是基于 Windows 消息处理机制的计算机辅助人工建树的实现方法。

故障树基本图元的操作一般按如下步骤来完成：

- 1) 选择图元。计算机根据鼠标点击的故障树图元按钮自动识别出要绘制的图元。
- 2) 绘制图元。根据鼠标在图形区拖动的位置用鼠标事件自动绘制出选中的图元。
- 3) 调整图元。利用鼠标事件对绘制的图元进行图形大小和位置自动调整。
- 4) 连接图元。通过鼠标操作图元的指针变量来连接调整好的各个基本图元。
- 5) 标注图元。通过鼠标操作浮动板进行图元所代表事件内容与概率值的输入。

整个故障树的绘制自上而下进行，并可根据需要任意给某个门（门及其下一级包含的子门、事件的总和）添加新的元素，直至完成所有门族及其所有成员的绘制。同时，系统能自动识别门与事件之间的关系。

采用动态建树的思想在计算机中进行故障树的绘制和创建，所设计的程序是基于 Windows 的应用程序，其主要操作工具是鼠标，这在很大程度上代替了原来的键盘输入方式。因此，故障树的建立主要依靠鼠标完成，首先在计算机屏幕上要绘制一个顶事件，然后再输入子事件，对于其他的事件依次进行。故障树图形的绘制完全由程序自动完成，用户只需指定事件之间的关系，通过菜单编辑器给出的选项，实现相应的门、事件的创建。

2.4.4.3 程序界面设计

界面环境作为人机信息的交流通道，应考虑人的心理对交互系统的影响，以及用户的能力。界面环境具有以下特点：

- (1) 功能齐全。本软件界面环境包含比较齐全的功能模块，如图形的绘制、编辑与修改模块、基本计算分析模块及转移事件模块等，方便实现软件的功能。
- (2) 美观性。应用程序在视觉上、概念上、语言上易于识别。视觉构件一看就懂，功能便于理解；界面文字意义清楚，无二义性。交互界面上的组件（如菜单、工具条、对话框等）图标化、立体化、动态化，方便用户的理解和使用。
- (3) 反馈性。用户可得到对于当前操作的立即、可见的反馈，从而了解系统当前的状态。反馈提醒用户进入某处特定的操作或操作的结果或出错信息，实现了反馈跟踪用户的操作过程。

软件使用 VC 进行程序界面设计，同时借用了 VC 的外观，包括主窗口、树状窗口、属性窗口、最小割集和重要度输出窗口，同时还有工具栏、菜单栏、状态栏等。程序操作界面如图 4.13-8 所示。

菜单栏中的文件、查看、编辑和帮助菜单均与 VC 等软件基本相同。其中编辑菜单中主要用来绘制和编辑故障树，例如添加子事件、删除、复制、剪切、粘贴、移动节点等操

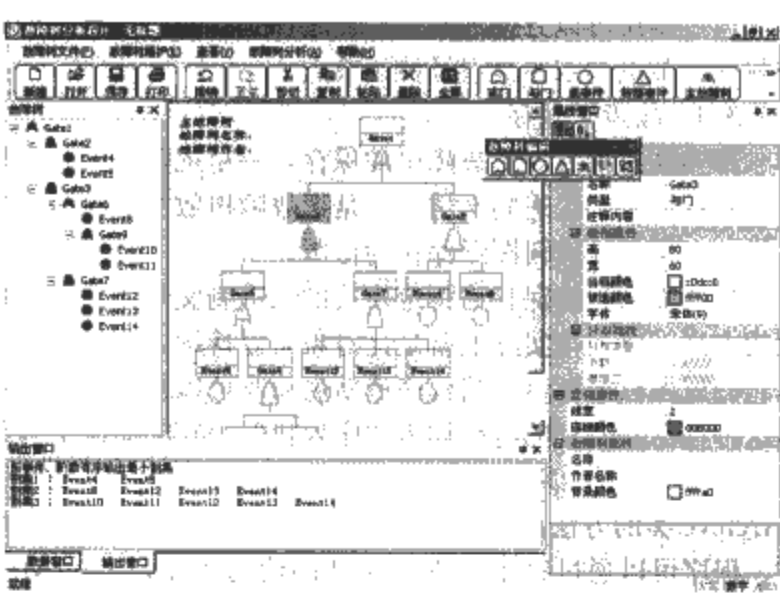


图 4.13-8 程序操作界面

作。故障树分析菜单主要是使用者在绘制完故障树图后进行定性分析还是定量分析，软件使用者可根据不同系统分析的目的作出适当的选择，同时还能够把分析结果保存为文本文件。

工具栏又称快捷按钮栏，是为了方便软件用户进行软件操作而设置的，它的功能完全可以在菜单栏中实现。软件中设计了两个工具条，第一个工具条主要用来完成一些文件编辑和帮助的基本任务，第二个工具条是在绘制故障树时经常使用的按钮。

绘图区是用户进行故障树绘制的区域，并且还可以对绘制的树图进行编辑、修改和删除等操作；树状窗口用树状控件来形象地显示当前的故障树。

属性窗口可以用来对故障树节点和整个故障树的属性进行修改，在此可以修改故障树每个节点的高度、宽度、类型、名称、相关内容，以及当前颜色和被选颜色等；能够输入底事件的分布类型及参数；同时还能够进行整个故障树的背景颜色、名称、作者姓名的输入和修改。

输出窗口用来输出当前故障树的检查结果和最小割集，重要度窗口用来输出当前故障树的重要度数据。

2.4.4.4 故障树图形显示

故障树在计算机屏幕上使用两种方式来显示，一种是图形表示，另一种是用经常使用的树控件形象地表示故障树。对于图形表示采用矢量图的方式绘制故障树图形，使用矢量图的目的是为了图形的缩放不失真，同时也可以对图形的各种属性进行编辑、修改。图形的位置由程序自动确定，软件中设计了一个事件图形单元，根据已有事件图形位置和事件之间的关系自动确定其位置的算法，这样生成的故障树图形既美观，又避免了用户浪费不必要的时间去调整故障树中的各个事件的位置，故障树各个事件之间的连接也是由程序根据各自的关系来进行连接的。对于大型的故障树绘制，每个屏幕只显示一个子树或主树，同时能够在各个子树之间转换。对于使用树控件来显示故障树，首先实现了一个显示树状控件的窗口，它包含了一个树状控件用来显示故障树的名称和类型。

2.4.4.5 故障树编辑操作（删除、剪切、复制、移动等）

为了实现软件中图形的删除、剪切、复制等操作，首先需要实现软件的选中操作，选中图形元素是对图形进行修改、删除，直接从图形上得到信息，以及在系统中统计和分析操作的基础。图形元素的选中操作方法有多种，可以点选，也可以使用区域选中。点选的原理简单，当在视图屏幕上按下鼠标键时，就得到按下点的屏幕像素坐标，将这个像

素坐标转换成实际坐标后,通过与所有的图形元素进行比较计算,可以判断这个点所在的图形元素。区域选中图形元素的实现过程比点选复杂,是通过判断各种图形元素是否与一个区域相交或包含在一个区域内来实现的。在这里采用了点选的方式进行故障树节点图形的选择,在类 CFtNode 中添加方法 PtInRect (CPoint pt) 来判断点 pt 是否选中故障树节点图形,在程序的视图类中添加鼠标处理事件,遍历整个故障来判断选中的故障树节点。

删除一个图形元素时,需要作两方面的删除操作:从数据中删除图形元素和从屏幕上及时删除图形元素。根据图形元素删除后能不能进行恢复,把删除类型分为两种:可恢复型和不可恢复型。可恢复型的删除是在操作时只把删除的数据部分作删除标记,系统正常运行时不再操作这个标记的数据项,从而达到了删除的目的,而不可恢复型删除则直接删除了图形元素。本软件采用了可恢复型删除操作,首先需要选中故障树图形中的某个节点,判断此节点是否可以删除,如果可以删除,则记录当前故障树数据并删除此节点,然后更新屏幕上的故障树图形。

复制和粘贴功能的实现要依靠 Windows 的剪贴板。Windows 的剪贴板实质上是一块内存空间,而且是一块对各个进程透明的内存空间。

复制的步骤:注册剪切板格式;打开剪切板;清空剪切

板;申请内存空间;将申请内存加锁;将数据拷入内存;将内存解锁;将内存中的数据放到 Windows 的剪贴板上;关闭剪贴板。粘贴的步骤:打开剪贴板;将剪贴板上的数据拷入内存;将内存中的数据拷入某个变量;关闭剪贴板。在“编辑”菜单下面的“复制”和“粘贴”子菜单下按上面的步骤实现了复制和粘贴操作。剪切操作的实现则是删除和复制操作的结合。

在应用软件中,Undo/Redo 功能为用户提供了方便,而多步 Undo/Redo 则更是如此。软件用 C++ 面向对象的程序设计技术,研究了多步 Undo/Redo 的实现方法。首先,建立一个基类 CEditRecord,对于每一种操作,都从该基类上派生出与操作相对应的类,记载操作过程,供以后进行具体的 Undo/Redo 操作;基类 CEditRecord 中的纯虚函数,为 Undo、Redo 操作提供接口。然后,建立一个用于控制 Undo/Redo 的类——CRecordCtrl。CRecordCtrl 类从基类 CObArray 上派生,用于记载已经进行过的操作,响应 Undo/Redo 命令等。其中的 nMaxStep 变量表示允许 Undo/Redo 的次数, nCurrRecord 变量表示当前的 Undo 的位置。函数 Undo () 和 Redo () 用于响应来自系统菜单、快捷键或者工具条的 Undo 和 Redo 命令。函数 SetMaxStep () 用于设置允许 Undo/Redo 的次数。

附 录

附录 A Γ 函数表

<i>m</i>	$\Gamma(\frac{1}{m}+1)$	<i>m</i>	$\Gamma(\frac{1}{m}+1)$	<i>m</i>	$\Gamma(\frac{1}{m}+1)$	<i>m</i>	$\Gamma(\frac{1}{m}+1)$
0.1	11!	1.1	0.965	2.1	0.886	3.1	0.894
0.2	6!	1.2	0.941	2.2	0.886	3.2	0.896
0.3	9.260	1.3	0.923	2.3	0.886	3.3	0.897
0.4	3.323	1.4	0.911	2.4	0.886	3.4	0.898
0.5	2.000	1.5	0.903	2.5	0.887	3.5	0.900
0.6	1.505	1.6	0.897	2.6	0.888	3.6	0.901
0.7	1.266	1.7	0.892	2.7	0.889	3.7	0.902
0.8	1.133	1.8	0.889	2.8	0.890	3.8	0.904
0.9	1.052	1.9	0.887	2.9	0.892	3.9	0.905
1.0	1.000	2.0	0.886	3.0	0.894	4.0	0.906

附录 B 标准正态分布函数 $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 数值表

<i>z</i>	−0.00	−0.01	−0.02	−0.03	−0.04	−0.05	−0.06	−0.07	−0.08	−0.09
−3.0	0.001 35	0.001 31	0.001 22	0.001 26	0.001 18	0.001 14	0.001 11	0.001 07	0.001 04	0.001 00
−2.9	0.001 87	0.001 81	0.001 75	0.001 70	0.001 64	0.001 59	0.001 54	0.001 49	0.001 44	0.001 40
−2.8	0.002 56	0.002 48	0.002 40	0.002 33	0.002 26	0.002 19	0.002 12	0.002 05	0.001 99	0.001 93
−2.7	0.003 47	0.003 36	0.003 26	0.003 17	0.003 07	0.002 98	0.002 89	0.002 80	0.002 72	0.002 64
−2.6	0.004 66	0.004 53	0.004 40	0.004 27	0.004 15	0.004 03	0.003 91	0.003 79	0.003 68	0.003 57
−2.5	0.006 21	0.006 04	0.005 87	0.005 70	0.005 54	0.005 39	0.005 23	0.005 09	0.004 94	0.004 80
−2.4	0.008 2	0.008 0	0.007 8	0.007 6	0.007 3	0.007 1	0.007 0	0.006 8	0.006 6	0.006 4
−2.3	0.010 7	0.010 4	0.010 2	0.009 0	0.0096	0.009 4	0.009 1	0.008 9	0.008 7	0.008 4
−2.2	0.013 9	0.013 6	0.013 2	0.012 9	0.012 6	0.012 2	0.011 9	0.011 6	0.011 3	0.011 0
−2.1	0.017 9	0.017 4	0.017 0	0.016 6	0.016 2	0.015 8	0.015 4	0.015 0	0.014 6	0.014 3
−2.0	0.022 8	0.022 2	0.021 7	0.021 2	0.020 7	0.020 2	0.019 7	0.019 2	0.018 8	0.018 3
−1.9	0.028 7	0.028 1	0.027 4	0.026 8	0.026 2	0.025 6	0.025 0	0.024 4	0.023 8	0.023 3
−1.8	0.035 9	0.035 2	0.034 4	0.033 6	0.032 9	0.032 2	0.031 4	0.030 7	0.030 0	0.029 4
−1.7	0.044 6	0.043 6	0.042 7	0.041 8	0.040 9	0.040 1	0.039 2	0.038 4	0.037 5	0.036 7
−1.6	0.054 8	0.053 7	0.052 2	0.051 6	0.050 5	0.049 5	0.048 5	0.047 5	0.046 5	0.045 5
−1.5	0.066 8	0.065 5	0.064 3	0.063 0	0.061 8	0.060 6	0.059 4	0.058 2	0.057 0	0.055 9
−1.4	0.080 8	0.079 3	0.077 8	0.076 4	0.074 9	0.073 5	0.072 2	0.070 8	0.069 4	0.068 1
−1.3	0.096 8	0.095 1	0.093 4	0.091 8	0.090 1	0.088 5	0.086 9	0.085 3	0.083 8	0.082 3
−1.2	0.115 1	0.113 1	0.111 2	0.109 3	0.107 5	0.105 6	0.103 8	0.102 0	0.100 3	0.098 5
−1.1	0.135 7	0.133 5	0.131 4	0.129 2	0.127 1	0.125 1	0.123 0	0.121 0	0.119 0	0.117 0
−1.0	0.158 7	0.156 2	0.153 9	0.151 5	0.149 2	0.146 9	0.144 6	0.142 3	0.140 1	0.137 9
−0.9	0.184 1	0.181 4	0.178 8	0.176 2	0.173 6	0.171 1	0.168 5	0.166 0	0.163 5	0.161 1
−0.8	0.211 9	0.209 0	0.206 1	0.203 3	0.200 5	0.197 7	0.194 9	0.192 2	0.189 4	0.186 7
−0.7	0.242 0	0.238 9	0.235 8	0.232 7	0.229 7	0.226 6	0.223 6	0.220 6	0.217 7	0.214 8
−0.6	0.274 3	0.270 9	0.267 6	0.264 3	0.261 1	0.257 8	0.254 6	0.251 4	0.248 3	0.245 1
−0.5	0.308 5	0.305 0	0.301 5	0.298 1	0.294 6	0.291 2	0.287 7	0.284 3	0.281 0	0.277 6
−0.4	0.344 6	0.340 9	0.337 2	0.333 6	0.330 0	0.326 4	0.322 8	0.319 2	0.315 6	0.312 1
−0.3	0.382 1	0.378 3	0.374 5	0.370 7	0.366 9	0.363 2	0.359 4	0.355 7	0.352 0	0.348 3
−0.2	0.420 7	0.416 8	0.412 9	0.409 0	0.405 2	0.401 3	0.397 4	0.393 6	0.389 7	0.385 9
−0.1	0.460 2	0.456 2	0.452 2	0.448 3	0.444 3	0.440 4	0.436 4	0.432 5	0.428 6	0.424 7
−0.0	0.500 0	0.496 0	0.492 0	0.488 0	0.484 0	0.480 1	0.476 1	0.472 1	0.4681	0.464 1

续表

z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.500 0	0.504 0	0.508 0	0.512 0	0.516 0	0.519 9	0.523 9	0.527 9	0.531 9	0.535 9
0.1	0.539 8	0.543 8	0.547 8	0.551 7	0.555 7	0.559 6	0.563 6	0.567 6	0.571 4	0.575 3
0.2	0.579 3	0.583 2	0.587 1	0.591 0	0.594 8	0.598 7	0.602 6	0.606 4	0.610 3	0.614 1
0.3	0.617 9	0.621 7	0.625 5	0.629 3	0.633 1	0.636 8	0.640 6	0.644 3	0.648 0	0.651 7
0.4	0.655 4	0.659 1	0.662 8	0.666 4	0.670 0	0.673 6	0.677 2	0.680 6	0.684 4	0.687 9
0.5	0.691 5	0.695 0	0.698 5	0.701 9	0.705 4	0.708 8	0.712 3	0.715 7	0.719 0	0.722 4
0.6	0.725 7	0.729 1	0.732 4	0.735 7	0.738 9	0.742 2	0.745 4	0.748 6	0.751 7	0.754 9
0.7	0.758 0	0.761 1	0.764 2	0.767 3	0.770 3	0.773 4	0.776 4	0.779 4	0.782 3	0.785 2
0.8	0.788 1	0.791 0	0.793 9	0.796 7	0.799 5	0.803 2	0.805 1	0.807 8	0.810 6	0.813 3
0.9	0.815 9	0.818 6	0.821 2	0.823 8	0.826 4	0.828 9	0.831 5	0.834 0	0.836 5	0.838 9
1.0	0.841 3	0.843 8	0.846 1	0.848 5	0.850 8	0.853 1	0.855 4	0.857 7	0.859 9	0.862 1
1.1	0.864 3	0.866 5	0.868 6	0.870 8	0.872 9	0.874 9	0.877 0	0.879 0	0.881 0	0.883 0
1.2	0.884 9	0.886 9	0.888 8	0.890 7	0.892 5	0.894 4	0.896 2	0.898 0	0.899 7	0.901 5
1.3	0.903 2	0.904 9	0.906 6	0.908 2	0.909 9	0.911 5	0.913 1	0.914 7	0.916 2	0.917 7
1.4	0.919 2	0.920 7	0.922 2	0.923 6	0.925 1	0.926 5	0.927 8	0.929 2	0.930 6	0.931 9
1.5	0.933 2	0.934 5	0.935 7	0.937 0	0.938 2	0.939 4	0.940 6	0.941 8	0.943 0	0.944 1
1.6	0.945 2	0.946 3	0.947 4	0.948 4	0.949 5	0.950 5	0.951 5	0.952 5	0.953 5	0.954 5
1.7	0.955 4	0.956 4	0.957 3	0.958 2	0.959 1	0.959 9	0.960 8	0.961 6	0.962 5	0.963 3
1.8	0.964 1	0.964 8	0.965 6	0.966 4	0.967 1	0.967 8	0.968 6	0.969 3	0.970 0	0.970 6
1.9	0.971 3	0.971 9	0.972 6	0.973 2	0.973 8	0.974 4	0.975 0	0.975 6	0.976 2	0.976 7
2.0	0.977 2	0.977 8	0.978 3	0.978 8	0.979 3	0.979 8	0.980 3	0.980 8	0.981 2	0.981 7
2.1	0.982 1	0.982 6	0.983 0	0.983 4	0.983 8	0.984 2	0.984 6	0.985 0	0.985 4	0.985 7
2.2	0.986 1	0.986 4	0.986 8	0.987 1	0.987 4	0.987 8	0.988 1	0.988 4	0.988 7	0.989 0
2.3	0.989 3	0.989 6	0.989 8	0.990 1	0.990 4	0.990 6	0.990 9	0.991 1	0.991 3	0.991 6
2.4	0.991 8	0.992 0	0.992 2	0.992 5	0.992 7	0.992 9	0.993 1	0.993 2	0.993 4	0.993 6
2.5	0.993 79	0.993 96	0.994 13	0.994 30	0.994 46	0.994 61	0.994 77	0.994 92	0.995 06	0.995 20
2.6	0.995 34	0.995 47	0.995 60	0.995 73	0.995 86	0.995 98	0.996 09	0.996 20	0.996 32	0.996 43
2.7	0.996 53	0.996 64	0.996 74	0.996 83	0.996 93	0.997 02	0.997 11	0.997 20	0.997 28	0.997 37
2.8	0.997 45	0.997 52	0.997 60	0.997 67	0.997 74	0.997 81	0.997 88	0.997 95	0.998 01	0.998 07
2.9	0.998 13	0.998 19	0.998 25	0.998 31	0.998 36	0.998 41	0.998 46	0.998 51	0.998 56	0.998 61
3.0	0.998 65	0.998 69	0.998 74	0.998 78	0.998 82	0.998 86	0.998 89	0.998 93	0.998 97	0.999 00

附录 C χ^2 分布下侧分位数 $\chi^2_p(f)$ 表

$\chi^2_p(f)$ $f \backslash p$	0.01	0.025	0.05	0.10	0.25	0.75	0.90	0.95	0.975	0.99
1		0.001	0.004	0.016	0.10	1.32	2.71	3.84	5.02	6.64
2	0.02	0.051	0.10	0.21	0.58	2.77	4.61	5.99	7.38	9.21
3	0.12	0.216	0.35	0.58	1.21	4.11	6.25	7.82	9.35	11.34
4	0.30	0.48	0.71	1.06	1.92	5.39	7.78	9.49	11.14	13.28
5	0.55	0.83	1.15	1.61	2.68	6.63	9.24	11.07	12.83	15.09
6	0.87	1.24	1.64	2.20	3.46	7.84	10.65	12.59	14.45	16.81
7	1.24	1.69	2.17	2.83	4.26	9.04	12.02	14.07	16.01	18.48
8	1.65	2.18	2.73	3.49	5.07	10.22	13.36	15.51	17.54	20.09
9	2.10	2.70	3.33	4.17	5.90	11.39	14.68	16.92	19.02	21.67
10	2.56	3.25	3.94	4.87	6.74	12.55	15.99	18.31	20.48	23.21
11	3.05	3.82	4.58	5.58	7.58	13.70	17.28	19.68	21.92	24.73
12	3.57	4.40	5.23	6.30	8.44	14.85	18.55	21.03	23.34	26.22
13	4.11	5.01	5.89	7.04	9.30	15.98	19.81	22.36	24.74	27.69
14	4.66	5.63	6.57	7.79	10.17	17.12	21.06	23.69	26.12	29.14
15	5.23	6.26	7.26	8.55	11.04	18.25	22.31	25.00	27.49	30.58
16	5.81	6.91	7.96	9.31	11.92	19.37	23.54	26.30	28.85	32.00
17	6.41	7.56	8.67	10.09	12.79	20.49	24.77	27.59	30.19	33.41
18	7.02	8.23	9.39	10.87	13.68	21.61	25.99	28.87	31.53	34.81
19	7.63	8.91	10.12	11.65	14.56	22.72	27.20	30.14	32.85	36.19
20	8.26	9.59	10.85	12.44	15.45	23.83	28.41	31.41	34.17	37.57
21	8.90	10.28	11.59	13.24	16.34	24.94	29.62	32.67	35.48	38.93

续表

$\chi^2_p(f)$ $f \backslash p$	0.01	0.025	0.05	0.10	0.25	0.75	0.90	0.95	0.975	0.99
22	9.54	10.98	12.34	14.04	17.24	26.04	30.81	33.92	36.78	40.29
23	10.20	11.69	13.09	14.85	18.14	27.14	32.01	35.17	38.08	41.64
24	10.86	12.40	13.85	15.66	19.04	28.24	33.20	36.42	39.36	42.98
25	11.52	13.12	14.61	16.47	19.94	29.34	34.38	37.65	40.65	44.31
26	12.20	13.84	15.38	17.29	20.84	30.44	35.56	38.89	41.92	45.64
27	12.88	14.57	16.15	18.11	21.79	31.53	36.74	40.11	43.19	46.96
28	13.57	15.31	16.93	18.94	22.66	32.62	37.92	41.34	44.46	48.28
29	14.26	16.05	17.71	19.77	23.57	33.71	39.09	42.56	45.72	49.59
30	14.59	16.79	18.49	20.60	24.48	34.80	40.26	43.77	46.98	50.89
31	15.66	17.54	19.28	21.43	25.39	35.89	41.42	44.99	48.23	52.19
32	16.36	18.29	20.07	22.27	26.30	36.97	42.59	46.19	49.48	53.49
33	17.07	19.05	20.87	23.11	27.22	38.06	43.75	47.40	50.72	54.78
34	17.79	19.81	21.66	23.95	28.14	39.14	44.90	48.60	51.97	56.06
35	18.51	20.57	22.47	24.80	29.05	40.22	46.06	49.80	53.20	57.34
36	19.23	21.34	23.27	25.64	29.97	41.30	47.21	51.00	54.44	58.62
37	19.96	22.11	24.08	26.49	30.89	42.38	48.36	52.19	55.67	59.89
38	20.69	22.88	24.88	27.34	31.82	43.46	49.51	53.38	56.90	61.16
39	21.43	23.65	25.70	28.20	32.74	44.54	50.66	54.57	58.12	62.43
40	22.16	24.43	26.51	29.05	33.66	45.62	51.81	55.76	59.34	63.69
41	22.91	25.22	27.33	29.91	34.59	46.69	52.95	56.94	60.56	64.95
42	23.65	26.00	28.14	30.77	35.51	47.77	54.09	58.12	61.78	66.21
43	24.40	26.79	28.97	31.63	36.44	48.84	55.23	59.30	62.99	67.46
44	25.15	27.58	29.79	32.49	37.36	49.91	56.37	60.48	64.20	68.71
45	25.90	28.37	30.61	33.35	38.29	50.99	57.51	61.66	65.41	69.96
46	26.66	29.16	31.44	34.22	39.22	52.06	58.64	62.83	66.62	71.20
47	27.42	29.96	32.27	35.08	40.15	53.13	59.77	64.00	67.82	72.44
48	28.18	30.76	33.10	35.95	41.08	54.20	60.91	65.17	69.02	73.68
49	28.94	31.56	33.93	36.82	42.01	55.27	62.04	66.34	70.22	74.92
50	29.71	32.36	34.76	37.69	42.94	56.33	63.17	67.51	71.42	76.15
51	30.48	33.16	35.60	38.56	43.87	57.40	64.30	68.67	72.62	77.39
52	31.25	33.97	36.44	39.43	44.81	58.47	65.42	69.83	73.81	78.62
53	32.02	34.78	37.28	40.31	45.74	59.53	66.55	70.99	75.00	79.84
54	32.79	35.59	38.12	41.18	46.68	60.60	67.67	72.15	76.19	81.07
55	33.57	36.40	38.96	42.06	47.61	61.67	68.80	73.31	77.38	82.29
56	34.35	37.21	39.80	42.94	48.55	62.73	69.92	74.47	78.57	83.51
57	35.13	38.03	40.65	43.82	49.48	63.79	71.04	75.62	79.75	84.73
58	35.91	38.84	41.49	44.70	50.42	64.86	72.16	76.78	80.94	85.95
59	36.70	39.66	42.34	45.58	51.36	65.92	73.28	77.03	82.12	87.17
60	37.49	40.48	43.19	46.46	52.29	66.98	74.40	79.08	83.30	88.38
61	38.27	41.30	44.04	47.34	53.23	68.04	75.51	80.23	84.47	89.59
62	39.06	42.13	44.89	48.23	54.17	69.10	76.63	81.38	85.65	90.80
63	39.86	42.95	45.74	49.11	55.11	70.17	77.75	82.53	86.83	92.01
64	40.65	43.78	46.60	50.00	56.05	71.23	78.86	83.68	88.00	93.22
65	41.44	44.60	47.45	50.88	56.99	72.29	79.97	84.82	89.18	94.42
66	42.24	45.43	48.31	51.77	57.93	73.34	81.09	85.97	90.35	95.63
67	43.04	46.26	49.16	52.66	58.87	74.40	82.20	87.11	91.52	96.83
68	43.84	47.09	50.02	53.55	59.81	75.46	83.31	88.25	92.69	98.03
69	44.64	47.92	50.88	54.44	60.76	76.52	84.42	89.39	93.86	99.23
70	45.44	48.76	51.74	55.33	61.70	77.58	85.53	90.53	95.02	100.43
71	46.25	49.59	52.60	56.22	62.64	78.63	86.64	91.67	96.19	101.62
72	47.05	50.43	53.46	57.11	63.59	79.69	87.74	92.81	97.35	102.82
73	47.86	51.27	54.33	58.01	64.53	80.75	88.85	93.95	98.52	104.01
74	48.67	52.10	55.19	58.90	65.47	81.80	89.96	95.08	99.68	105.20
75	49.48	52.94	56.05	59.80	66.42	82.86	91.06	96.22	100.84	106.39
76	50.29	53.78	56.92	60.69	67.36	83.91	92.17	97.35	102.00	107.58
77	51.10	54.62	57.79	61.59	68.31	84.97	93.27	98.48	103.16	108.77
78	51.91	55.47	58.65	62.48	69.25	86.02	94.37	99.62	104.32	109.96
79	52.73	56.31	59.52	63.38	70.20	87.08	95.48	100.75	105.47	111.14
80	53.54	57.15	60.39	64.28	71.15	88.13	96.58	101.88	106.63	112.33
81	54.36	58.00	61.26	65.18	72.09	89.18	97.68	103.01	107.78	113.51
82	55.17	58.85	62.13	66.08	73.04	90.24	98.78	104.14	108.94	114.70
83	55.99	59.69	63.00	66.98	73.99	91.29	99.88	105.27	110.09	115.88

续表

$\chi_p^2(f)$ $f \backslash p$	0.01	0.025	0.05	0.10	0.25	0.75	0.90	0.95	0.975	0.99
84	56.81	60.54	63.88	67.88	74.93	92.34	100.98	106.40	111.24	117.06
85	57.63	61.39	64.75	68.78	75.88	93.39	102.08	107.52	112.39	118.24
86	58.46	62.24	65.62	69.68	76.83	94.45	103.18	108.65	113.54	119.41
87	59.28	63.10	66.50	70.58	77.72	95.50	104.28	109.77	114.69	120.59
88	60.10	63.94	67.37	71.48	78.73	96.55	105.37	110.90	115.84	121.77
89	60.93	64.79	68.25	72.39	79.68	97.60	106.47	112.02	116.99	122.94
90	61.75	65.65	69.13	73.29	80.63	98.65	107.57	113.15	118.14	124.12
91	62.58	66.50	70.00	74.20	81.57	99.70	108.66	114.27	119.28	125.29
92	63.41	67.36	70.88	75.10	82.52	100.75	109.76	115.39	120.43	126.46
93	64.24	68.21	71.76	76.01	83.47	101.80	110.85	116.51	121.57	127.63
94	65.07	69.07	72.64	76.91	84.43	102.85	111.94	117.63	122.72	128.80
95	65.90	69.93	73.52	77.82	85.38	103.90	113.04	118.75	123.86	129.97
96	66.73	70.78	74.40	78.73	86.33	104.95	114.13	119.87	125.00	131.14
97	67.56	71.64	75.28	79.63	87.28	106.00	115.22	120.99	126.14	132.31
98	68.40	72.50	76.16	80.54	88.23	107.05	116.32	122.11	127.28	133.48
99	69.23	73.36	77.05	81.45	89.18	108.09	117.41	123.23	128.42	134.64
100	70.07	74.22	77.93	82.36	90.13	109.14	118.50	124.34	129.56	135.81

参 考 文 献

- [1] 陆俭国,王景芹. 低压保护电器可靠性理论及其应用. 北京:机械工业出版社,2004.
- [2] 陆俭国. 电器可靠性理论及其应用. 北京:机械工业出版社,1996.
- [3] 卡帕 KC,兰伯森 LR. 工程设计中的可靠性. 张智铁,译. 北京:机械工业出版社,1984.
- [4] 川琦羲人. 可靠性设计. 王思年,夏琦,译. 北京:机械工业出版社,1988.
- [5] 陆俭国. 电工产品可靠性. 北京:机械工业出版社,1991.
- [6] 戴树森,费鹤良,王玲玲,等. 可靠性试验及其统计分析. 北京:国防工业出版社,1983.
- [7] 肖德辉. 可靠性工程. 北京:宇航出版社,1985.
- [8] 茆诗松,王玲玲. 可靠性统计. 上海:华东师范大学出版社,1984.
- [9] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用. 北京:清华大学出版社,1983.
- [10] 中国矿业学院数学教研室. 数学手册. 北京:科学出版社,1981.
- [11] 严圣武. 质量控制. 北京:北京工业学院出版社,1986.
- [12] 陆俭国. 电工产品抽样检查中几个基本理论问题的分析. 电工技术学报,1990(4).
- [13] Lu Jianguo, Jin Fuqun. Reliability Design on Electromagnetic System of Relay // 36th ANNUAL NATIONAL RELAY CONFERENCE. Oklahoma, 1988.
- [14] Jin Fuqun, Lu Jianguo. Reliability Mathematical Model for Combined Reserve Design Circuit and Its Application in Relay // 38th ANNUAL NATIONAL RELAY CONFERENCE. Oklahoma, 1990.
- [15] Lu Jianguo, Li Zhigang, Wang Jingqin. The Device of Research on Relay Contact Reliability // 36th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and 15th International Conference on Electrical Contacts. Montreal, 1990.
- [16] 王炳兴,王玲玲. 定时截尾指数分布的修正最大似然估计. 高校应用数学学报,1995(10):295-302.
- [17] 茆诗松,罗朝斌. 无失效数据的可靠性分析. 数理统计与应用概率,1989(4):489-507.
- [18] 张志华. 无失效数据的统计分析. 数理统计与应用概率,1995(10):94-101.
- [19] 张忠占,杨振海. 无失效数据的统计分析. 数理统计与应用概率,1989(4):508-515.
- [20] 张继昌. 无失效数据的 Bayes 分析. 高等应用数学学报,1995(10):19-24.
- [21] 戚仕新. 低压成套设备产品开发初探. 江苏电器,2001(5):7-9.
- [22] 张卫东. 低压成套设备的现状与发展. 低压电器,2002(1):3-8.
- [23] 李全灿. 电控设备可靠性指标体系及其评估方法初探. 电气传动,1996,26(2):45-47,51.
- [24] 姜启源. 数学模型. 2 版. 北京:高等教育出版社,2003.
- [25] 石建,郭跃华. 基于指数标度的层次分析法及其应用. 南通工学院学报:自然科学版,2004,3(4):4-7.
- [26] 樊宏,戴良铁. 基于层次分析法的岗位评价报酬要素权重确定方法. 价值工程,2004,23(7):55-57.
- [27] 骆正清,杨善林. 层次分析法中几种标度的比较. 系统工程理论与实践,2004,24(9):51-60.
- [28] 王鹏,宋保维,曹廷旭. 基于互补判断矩阵权最小平方方法的层次分析法. 系统工程与电子技术,2004,26(5):608-609,689.
- [29] 肖峻,罗凤章,王成山. 区间层次分析法的权重求解方法比较研究. 电力系统及其自动化学报,2004,16(3):12-16.
- [30] 史定华,王松瑞. 故障树分析技术方法和理论. 北京:北京师范大学出版社,1993.
- [31] 胡云昌,陈金水. 求系统失效树最小割集的新方法. 中国造船,1989(104):110-120.
- [32] 钱能. C++ 程序设计教程. 北京:清华大学出版社,2001.
- [33] 陆俭国,苏秀苹. 电器电磁系统可靠性优化设计理论与应用. 北京:机械工业出版社,2003.
- [34] 胡昌寿. 航天可靠性设计手册. 北京:机械工业出版社,1999.
- [35] 刘婉如,徐信之. 参数设计与容差设计. 北京:国防工业出版社,1988.
- [36] 牟致忠. 可靠性设计. 北京:机械工业出版社,1993.
- [37] 卢玉明. 机械零件的可靠性设计. 北京:高等教育出版社,1989.
- [38] 刘善维. 机械零件的可靠性优化设计. 北京:中国科学出版社,1993.
- [39] 苏秀苹. 电器电磁机构可靠性设计技术及优化设计技术的研究. 天津:河北工业大学,1999.
- [40] 苏秀苹. 电器中机械零件与电磁系统可靠性设计方法的研究. 天津:河北工业大学,1993.
- [41] 任耀先. 电磁铁优化设计. 北京:机械工业出版社,1990.
- [42] 费鸿俊,张冠生. 电磁系统动态分析与计算. 北京:机械工业出版社,1993.
- [43] 周广涛. 计算机辅助可靠性工程. 北京:宇航出版社,1990.
- [44] 王梓坤. 常用数学公式大全. 重庆:重庆出版社,1991.
- [45] 张英会,刘辉航,王德成. 弹簧手册. 北京:机械工业出版社,1997.
- [46] 牟致忠. 机械零件可靠性设计. 北京:机械工业出版社,1988.
- [47] 陈立. 圆柱螺旋压缩弹簧的可靠性设计. 弹簧工程,1991,(2):26-37.
- [48] 郑培杰,钱忠厚. 电器产品中弹簧的计算机辅助设计. 防爆电器,1990,(1):36-38.
- [49] 佟闻,孟庆龙. 电器弹簧的优化设计. 电杂志,1992,(2):38-44.
- [50] Dhingra A K, Bennage W A. Discrete and Continuous Variable Structural Optimization Using Tabu Search. Engineering Optimization, 1995,(24):177-196.
- [51] 董玉革. 机械模糊可靠性设计. 北京:机械工业出版社,2000.
- [52] 陆俭国,张乃宽,王景芹. 继电器触头回跳的研究. 电工技术学报,1988(1):6-12.

第5篇 低压电器试验与检测技术

主编单位：河北工业大学

苏州电器科学研究所有限公司

天津市电工技术科学研究院

浙江正泰电器股份有限公司

北京人民电器厂

苏州万龙集团有限公司

主 编：李 奎 陆俭国 胡德霖 马玉泰 居大伟 林黎明
武 一 南 寅

编写人员：李 奎（河北工业大学）

陆俭国（河北工业大学）

胡德霖（苏州电器科学研究所有限公司）

马玉泰（天津市电工技术科学研究院）

居大伟（天津市电工技术科学研究院）

林黎明（浙江正泰电器股份有限公司）

武 一（河北工业大学）

南 寅（北京人民电器厂）

张乃宽（河北工业大学）

李文华（河北工业大学）

王书成（浙江正泰电器股份有限公司）

赵志群（北京人民电器厂）

杨万生（天津市电工技术科学研究院）

张晓玲（天津市电工技术科学研究院）

程玉标（苏州万龙集团有限公司）

第1章 概述

随着科学技术的不断发展,社会生产、生活等各方面对能源的消耗越来越大。在各种能源中又以电能的使用最为广泛,因此电能已成为我国工农业和交通运输业的主要能源。在电能的生产、传输和应用的过程中,电网及用电设备的转换、控制、保护和调节都要依靠各种电器来完成。由于生产的电气化和自动化程度迅速提高,电器产品所起的作用也越来越重要,若电器产品发生故障,往往要造成重大事故,给国民经济带来重大的损失,因此,保证电器产品的运行可靠、性能良好具有十分重要的意义。

低压电器试验是鉴定低压电器产品质量的一个重要环节,电器试验与产品的质量、研究开发密切相关。试验的目的就是验证产品是否符合标准规定的技术要求;检查产品在制造上是否存在影响运行的各种缺陷;另外,在产品研究性试验中,通过对试验参数的分析,可以找出改进设计、提高工艺性的途径。所以产品的试验不是一种消极的措施,而是设计、生产出优质产品的积极手段。低压电器产品的试验离不开试验参数的测试,因此测试技术和试验设备在低压电器试验中必不可少。电器测试技术是一门专门的科学技术,它涉及到标准要求、测试方法、测试设备、测试仪器及测试技术等方面。在近代科学突飞猛进的发展过程中,计算机技术也渗透到电器测试中,同时出现了一些新的技术。

在低压电器电寿命试验中一般都要测定主电路电流、触头两端电压以及电源电压等瞬态信号的波形,传统的测量设备主要是光线示波器,即以感光纸进行记录的光线示波器,但由于光线示波器振子采用悬丝结构,机械惯性大,所以其测量的电信号频率不能太高,无法正确测量及显示触头断开时的过电压信号。此外,电器试验时试验电路的功率因数、时间常数、电源频率、焦耳积分(I^2t)、燃弧时间等试验参数也无法直接得出。20世纪80年代,国外开始将电子技术应用于电器试验的参数测量中,即采用瞬态波形记录仪,它将被测信号经A/D转换器采集后变成数字量,经存储并通过相应接口传送给计算机,经计算机处理后不仅可显示并打印被测信号的波形,而且可直接显示各试验参数的数值,由于对信号进行采集的频率足够高,所以还可以测量并显示触头断开时所产生的过电压信号。近年来,我国也研制成了电器试验数据高速采集与处理系统,其性能与国外产品相近,可完全满足电器试验的需要。

接触电阻是触点接触工作性能的最基本的参数,接触电阻直接反映继电器触点接触的可靠性。在研究继电器可靠性过程中,一般都要对触点接触电阻进行监测。因此触点接触电阻的测量是继电器可靠性研究中的重要一环。工程中,通常采用四端法(其测试条件为开路电压6V,电流10mA)来测量实际触点的接触电阻,对于大容量的触点,也有采用27V×100mA(测试条件为开路电压27V,电流100mA)的

方法来测量接触电阻。同时,为了提高测量精度和判断触点的接触好坏,出现了接触电阻的特殊测量方法,即用脉冲电流来测量接触电阻。

低压电器触头上电弧对触头的电磨损,严重地缩短了电器的电寿命。灭弧室设计的好坏又直接影响灭弧性能。所以对电弧运动过程的实时、动态测试研究不仅能改进灭弧室的设计,更重要的是能够很好地分析研究电弧进入灭弧室所受的电动力、热动力、气体阻力和绝缘栅阻力的综合作用,从而改进电器结构,并使其性能大幅度提高。传统的电弧研究方法有探针法、电磁法、光谱法等,通过这些方法测试电弧的运动过程,可以获得电弧的物理特征参数。但要研究电弧运动过程全貌就必须拍摄电弧从燃弧到熄弧的全过程。对电弧形态的观测,一般是采用多镜头快速摄影器、高速摄影机、电快门的高速摄影装置、变像管摄影机等。胶片要经过曝光、冲洗、成像等程序,操作周期长,每一程序都影响图像的精度,难以定量分析。同时还存在着拍摄费用高,拍摄速度慢的缺点。随着电子计算机、高速A/D及存储电路技术的飞速发展,使得以光电二极管阵列及电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)为图像传感器的高速摄像技术取代机械高速摄影成为可能。

本篇主要介绍低压电器的试验与检测技术问题,全篇共分8章,第2章介绍了低压电器试验中测量的基本知识,包括测量的基本概念、测量方法和测量误差、仪器仪表误差和准确度。

第3章介绍了试验参数的测量,包括电压、电流、功率等电量的测量及时间、焦耳积分、温度等非电量的测量。

第4章介绍了低压电器试验的计算机测试技术。低压电器产品不同,计算机的测试技术也不同。针对断路器、接触器、剩余动作电流保护器、过载继电器等产品的不同试验特点,介绍了这些产品的主要性能测试的计算机技术。

第5章介绍了低压电器试验的试验数据高速采集与处理技术,包括电器试验参数的计算、试验数据高速采集与处理的软硬件。

第6章介绍了接触电阻的测量技术和应用,以及电器电弧的拍摄技术。

第7章介绍了低压电器试验中的常用仪器仪表,包括指示仪表、数字仪表、比较式仪器、扩大量程装置、记录仪器等。

第8章介绍了低压电器试验及常用设备,包括电源、负载阻抗设备、温升、介电性能、动作特性、短路特性、材料、环境等试验及设备。电磁兼容试验也是低压电器特别是一些智能电器的重要试验内容,本章对低压电器的电磁兼容试验及设备进行了详细介绍。最后介绍了一些其他常用试验及设备,如外壳防护等级、振动、冲击等试验设备。

第 2 章 低压电器试验中测量的基本知识

在低压电器试验中离不开各种有关电量和非电量的测量。为了试验的科学性和可比性，必须确保测量的准确性，因此掌握低压电器试验中的测量技术，合理地选择测量方法和适当地配置测量仪器仪表对低压电器试验有重要的保证作用。

1 概述

在自然界中，对任何不同的研究对象，如果要从数量方面对它进行评价，都是通过测量代表其特性的物理量来实现的。

1.1 测量的基本方程

所谓测量，就是通过物理实验的方法，把被测的量与其同种类的习惯上作为单位的量进行比较的过程。测量的结果可以用数值（大小及符号）和单位两部分来表示。测量结果也可以用曲线、列表等方式来表示，它们同样包含数值和单位。

如测量结果的数值为 A_x ，测量单位为 x_0 ，则被测量 x 可表示为

$$x = A_x x_0 \tag{5.2-1}$$

式 (5.2-1) 称为测量的基本方程式。它可以这样来理解：被测量 x 是 A_x 个单位量 x_0 。

被测量的数值与所选定的测量单位的大小有关。例如，在测量同一被测量 x 时，若先后用测量单位 x_{01} 、 x_{02} ，根据测量基本方程可得

$$x = A_{x1} x_{01}$$

$$\text{和} \quad x = A_{x2} x_{02}$$

$$\text{则} \quad A_{x2}/A_{x1} = x_{01}/x_{02} \tag{5.2-2}$$

式 (5.2-2) 表明，被测量的数值与选定单位的大小成反比。

某一单位的大小和新单位的大小之比值 K 称为换算因数，即

$$K = x_{01}/x_{02}$$

$$\text{或} \quad A_{x2} = K A_{x1}$$

由此可见，换算因数是这样一个数，即用一定的单位测量某一量所得的数值。必须乘上这个数，才能得出用新单位表示的该被测量的数值。

1.2 单位制和单位

测量单位的确定和统一是非常重要的，为了对同一个量在不同时间、不同地点进行测量时得到相同的结果，必须采用公认的而且是固定不变的单位。只有这样的测量，才有实际意义。为此每个国家的计量机关都以专门的“法律”来规定这样的单位。在国际范围内，单位的通用是通过协商加以调整的。

单位制的建立，就是为解决测量单位不统一这一矛盾服务的。单位制的种类很多，如国际单位制、CGS 单位制等。

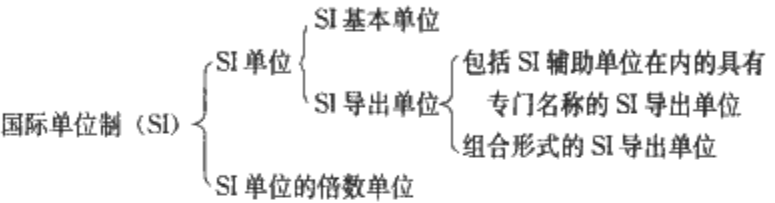
1.2.1 国际单位制（国际简称 SI）

国际单位制（SI）是国际计量大会推荐采用的一种一贯

单位制。它以反应物质世界基本性质的物理量作为单位基础，是一种比较科学和完善的单位制。就当前的科学技术水平而言，国际单位制是各种单位制中最好的一种。

国际单位制中，包括了整个自然科学的全部物理量的单位。

国际单位制的构成如下：



1.2.2 我国法定计量单位

我国的计量单位采用《中华人民共和国法定计量单位》。我国的法定计量单位包括：

- (1) 国际单位制的基本单位。
- (2) 国际单位制的辅助单位。
- (3) 国际单位制中具有专门名称的导出单位。
- (4) 国家选定的非国际单位制单位。
- (5) 由以上单位构成的组合形式的单位。
- (6) 由词头和以上单位所构成的十进倍数和分数单位。

1.2.3 低压电器试验中常用物理量及单位

根据法定计量单位的规定，现将低压电器试验中常用的物理量、单位及其符号列表如下。在表 5.2-1～表 5.2-4 中分别列出了国际单位制的基本单位及辅助单位、国际单位制中有专门名称的导出单位、国家选定的非国际单位制单位和用于构成十进倍数和分数单位的词头。

表 5.2-1 国际单位制的基本单位及辅助单位

类 别	量的名称	量的符号	单位名称	单位符号
基本单位	长度	L, l	米	m
	质量	m	千克(公斤)	kg
	时间	t	秒	s
	电流	I	安[培]	A
	热力学温度	T	开[尔文]	K
辅助单位	[平面]角	$\alpha, \beta, \gamma, \theta, \varphi$	弧度	rad
	立体角	Ω	球面度	sr

注 1. [] 内的字，是在不致混淆的情况下可以省略的字。
2. 人民生活 and 贸易中，质量习惯称为重量。

表 5.2-2 国际单位制中有专门名称的导出单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	其他表示式
频率	f	赫[兹]	Hz	s^{-1}
力	F	牛[顿]	N	$kg \cdot m/s^2$
压力，压强	p	帕[斯卡]	Pa	N/m^2
能[量]，功，热量	E, W, Q	焦[耳]	J	$N \cdot m$
功率	P	瓦[特]	W	J/s
电位，电压，电动势	V, U, E	伏[特]	V	W/A
电容	C	法[拉]	F	C/V

续表				
量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	其他表示式
电阻	R	欧[姆]	Ω	V/A
电导	G	西[门子]	S	Ω^{-1}
磁通[量]	Φ	韦[伯]	Wb	$V \cdot s$
磁通[量]密度, 磁感应强度	B	特[斯拉]	T	Wb/m^2
电感	L	亨[利]	H	Wb/A
摄氏温度	t, θ	摄氏度	$^{\circ}C$	K

表 5.2-3 国家选定的非国际单位制单位

量的名称	单位名称	单位符号	定义和说明
时间	分 [小]时 日,天	min h d	1 min=60s 1h=60min 1d=24h
旋转速度	转每分	r/min	转每分是 1min 内旋转一周的速度 1r/min= (1/60) s ⁻¹
级差	分贝	dB	两个同类功率量或可与功率类比的量之比值的常用对数乘以 10 等于 1 时的级差

表 5.2-4 用于构成十进倍数和分数单位的词头

所表示的因数	10 ⁹	10 ⁶	10 ³	10 ²	10 ¹	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁶
词头名称	吉[咖]	兆	千	百	十	分	厘	毫	微
词头符号	G	M	k	h	da	d	c	m	μ

1.3 测量设备

物理量的测量过程是一个试验过程,所以仅有测量单位还不能实现测量任务,还必须有根据测量单位复制出来的量具和用来比较被测量与量具的设备。为确定被测量值所必需的计量器具和辅助设备的总体称为测量设备。

计量器具一般可分为实物量具、计量仪器仪表以及用于统一量值的标准物质。

(1) 量具。量具是具有固定形态,用来复现或提供给定量的一个或多个已知量值的计量器具,如砝码、标准电池等。

(2) 计量仪器。计量仪器是将被测量值转换成可直接观察的示值或等效信息的计量器具,如电流表、温度计等。计量仪器可分为指示式计量仪器、记录式计量仪器、比较式计量仪器等。由独立而完备的器件构成的传感器,能产生附加或附属功能的变送器、检测器、调节器等也属于计量仪器。

2 测量方法和测量误差

2.1 测量方法

一个物理量的测量,可以用不同方法来实现。测量方法的选择与被测量的特性、测量条件及对准确度所提出的要求有关。测量方法可以根据各种不同的特征来分类。

2.1.1 按获得被测量值的方法分类

(1) 直接测量法。直接测量法是不必测量与被测量有函数关系的其他量,而能直接得到被测量值的测量方法。在这种测量中,可以用量具直接与被测量比较而量出被测量值,

也可以用按相应单位刻度的仪表读出被测量值。例如,用尺测量长度、用电流表测量电流等。

(2) 间接测量法。间接测量法是通过测量与被测量有函数关系的其他量,得到被测量值的测量方法。例如,测量电阻两端的电压 U 和流过的电流 I ,然后计算 $R=U/I$,求得电阻 R 值。当被测量不能直接测量或直接测量很复杂时,或者间接测出的结果比直接测出的更为准确时,可采用间接测量。

(3) 组合测量法。组合测量法是在直接或间接测量有函数关系的某些量的基础上,通过联立求解各函数关系式来确定被测量值的测量方法。例如,测量标准电阻的电阻温度系数 α 和 β 。因为标准电阻的电阻值与温度之间有下列关系

$$R_t = R_{20^{\circ}C} [1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2]$$

因此,测量 t_1 、 t_2 及 $20^{\circ}C$ 三个温度点的电阻值,解方程式组即可求得电阻温度系数 α 和 β 值。

2.1.2 按获得被测量数值的方法分类

(1) 直读测量法。直读测量法是根据仪表(仪器)的读数来判断被测量的大小,而作为测量单位的标准量具并不直接参与测量。为了读取被测量值,这些仪表(仪器)已预先按被测量的单位进行分度,因而实际上是被测量与量具的间接比较。例如,用万用表测量电流、电压等。

(2) 直接比较测量法。直接比较测量法是将被测量直接与标准量具相比较的测量方法。直接比较测量法可以分为以下几种:

1) 微差法(差值法)。在这种方法中,从测量仪表直接读取被测量 x 与某一已知标准量 A 的差值 α ,然后通过计算求得被测量

$$x = A + \alpha$$

运用微差法测量能够提高测量的准确度。如果 α 为 $0.1x$,则测量 α 时的不准确程度是以 $1/10$ 反映在确定 x 的准确度上。因此,差值 α 越小,测量结果的准确度越高。例如,用量块和比较仪器测量直径等。

2) 零值法。在这种方法中,用已知的、可调的标准量 A 与被测量 x 进行比较。通过调节 A ,使监视标准量与被测量是否平衡的指零仪指零,以此求得被测量

$$x = A$$

这种测量方法的准确度主要取决于标准量 A 的准确度和指零仪的灵敏度。只要 A 足够准确,指零仪的灵敏度足够高,测量结果中的误差就可减到很小。例如,用电位差计测量电动势等。

3) 替代法。在这种方法中,用已知的标准量 A 代替被测量 x ,且通过改变 A 使仪器的指示值恢复到原来状态,因此,被测量

$$x = A$$

这是一种极其准确的测量方法,仪器内部特性或外界因素都对测量结果没有影响。测量准确度取决于已知标准量 A 的准确度。例如,用标准电阻箱和比较仪器测量电阻等。

2.2 测量误差

任何测量都有误差,测量值都是被测量的近似值,就其理论极限来说,误差不可能等于零。测量误差是测量结果与被测量真值之差。真值是指被测量的真实大小,一般称为实际值。

按表示方式和性质等的不同,误差有不同类别。

2.2.1 按表示方式分类

(1) 绝对误差。绝对误差 Δx 是测量值 x 与被测量真值

x_0 之差, 即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (5.2-3)$$

因为被测量的真值通常是未知的, 计算时可以用比所用仪表准确度等级高一级的仪表的示值作为被测量的真值 (实际值)。

例如, 检定某一电压表, 其示值 U 为 100V 时的实际值 U_0 为 101.2V, 则该仪表在示值为 100V 的绝对误差为

$$\Delta U = U - U_0 = (100 - 101.2)V = -1.2V$$

在实际测量中常引入修正值 C , 它与绝对误差等值反号, 即

$$C = -\Delta x = x_0 - x$$

因此

$$x_0 = x + C$$

例如, 上例中电压表在示值 100V 处的修正值为 $C = 1.2V$ 。修正值 C 常以表格、曲线等形式给出, 将测量值加上相应的修正值以后, 即可消除误差的影响。

(2) 相对误差。绝对误差的表示方式可以体现出测量值与被测量实际值之间的偏离程度和方向, 但不能确切反映出测量的准确程度。例如, 测量两个电阻, 其中 $R_1 = 10\Omega$, 误差 $\Delta R_1 = 0.1\Omega$, $R_2 = 1000\Omega$, 误差 $\Delta R_2 = 1\Omega$ 。尽管 $\Delta R_1 < \Delta R_2$, 但由于 $\Delta R_1 = 0.1\Omega$, 相对于 10Ω 来讲是 1%; 而 $\Delta R_2 = 1\Omega$, 相对于 1000Ω 来讲是 0.1%。所以结论是 R_2 的测量比 R_1 的测量更准确, 因此引出相对误差的概念。

相对误差 γ 是绝对误差 Δx 与被测量真值 x_0 之比, 通常以百分数表示。即

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \approx \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (5.2-4)$$

例如, 有一量程为 0~10A 的 0.5 级电流表, 当示值 I 为 5A 时的实际值 I_0 为 5.02A, 则该仪表在示值为 5A 的相对误差为

$$\gamma = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100\% = \frac{5 - 5.02}{5.02} \times 100\% = -0.398\% \approx -0.4\%$$

相对误差通常用来评价测量的准确度。相对误差越小, 准确度越高。

2.2.2 按基本性质分类

(1) 系统误差。系统误差是在同一被测量的多次测量过程中, 保持恒定或以可预知方式变化的测量误差的分量。即在同一条件下多次测量同一量时, 误差的绝对值和符号保持不变; 或在条件改变时, 按一定规律变化的误差。

系统误差及其原因可能已知, 也可能未知。系统误差包括已定系统误差和未定系统误差。已定系统误差是指绝对值和符号已经确定的系统误差; 未定系统误差是指绝对值和符号未经确定的系统误差。已定系统误差可以用理论计算和实验方法求得, 并用修正方法消除它对测量结果的影响。

按产生原因的不同系统误差可分为以下几类:

- 1) 器具误差。计量器具本身所具有的误差。
 - 2) 人员误差。测量人员主观因素和操作技术所引起的误差。
 - 3) 环境误差。由于实际环境条件与规定条件不一致所引起的误差。
 - 4) 方法误差。测量方法不完善所引起的误差。
 - 5) 调整误差。由于测量前未能将计量器具或被测对象调整到正确位置或状态所引起的误差。
- 系统误差表征了测量结果偏离真值的程度。

(2) 随机误差。随机误差是在同一被测量的多次测量过程中, 以不可预知方式变化的测量误差的分量。即在同一条件下多次测量同一量时, 误差的绝对值和符号均是无规律随机变化的误差。

随机误差不可能修正。随机误差就个体而言是不确定的, 但其总体服从一定的统计规律, 一般为正态分布。因此, 可以用统计方法估计其对测量结果的影响程度。

随机误差的产生是由许多独立因素的微小变化的综合作用结果。例如, 在测量过程中温度的变化、空气的扰动、地面的振动、机构间隙及摩擦力的变化等。

随机误差表征了测量结果的分散程度。

(3) 粗大误差。粗大误差也称为疏失误差或粗差, 是明显超出规定条件下预期的误差。

粗大误差的数值远大于系统误差或随机误差, 实际上已不属于误差的范畴, 而是不应发生的由于粗心大意而产生的错误。例如, 错误的读取示值、使用有缺陷的计量器具、计量器具使用不正确及环境的干扰等。

含有粗大误差的测量值称为坏值。在数据处理时, 所有坏值都应剔除。

2.3 误差的统计处理

对随机误差, 可视为一个随机变量。系统误差也具有随机性, 这是由于测量条件不可能绝对恒定。故随机误差和系统误差的划分不是绝对的, 在测量实践中不仅对随机误差进行统计处理, 而且对于随机性较强的或不了解的系统误差也经常按统计处理。

2.3.1 算术平均值

设对被测量 x 进行 n 次等精密度测量, 即在同一条件下对同一被测量进行多次测量, 测量值 x_i 为

$$x_1, x_2, \dots, x_n$$

这里 x_i 是随机变量。

测量值的算术平均值 \bar{x} 的表达式为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.2-5)$$

当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 算术平均值 \bar{x} 的极限称为测量值的数学期望 E_x , 即

$$E_x = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (5.2-6)$$

E_x 也称为总体平均值。

随机误差表征测量结果的分散程度, 故随机误差 δ_i 为

$$\delta_i = x_i - E_x \quad (5.2-7)$$

而系统误差表征测量结果偏离真值的程度, 则系统误差 ϵ 为

$$\epsilon = E_x - x_0 \quad (5.2-8)$$

绝对误差 Δx_i 是测量值 x_i 与被测量真值 x_0 之差, 即

$$\Delta x_i = x_i - x_0 = \delta_i + \epsilon \quad (5.2-9)$$

由式 (5.2-9) 可见, 绝对误差等于随机误差 δ_i 与系统误差 ϵ 的代数和。若系统误差已消除, 即 $\epsilon = 0$, 则

$$\Delta x_i = \delta_i = x_i - E_x$$

$$\delta_i = x_i - x_0$$

即随机误差等于绝对误差。因此, 随机误差的算术平均值 $\bar{\delta}$ 为

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_0 \quad (5.2-10)$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = E_x$, 而 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_0 = x_0$, 则

$$\bar{\delta} = E_x - x_0$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时, $E_x = x_0$, 故

$$\bar{\delta} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \right) = E_x - x_0 = 0 \quad (5.2-11)$$

式 (5.2-11) 表明, 测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 随机误差的算术平均值等于零, 即随机误差的数学期望等于零。

对于有限次等精密度测量, 当测量次数足够多时, 则可认为

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \approx 0$$

$$E_x \approx \bar{x} \approx x_0$$

由此可见, 在仅有随机误差的情况下, 当测量次数足够多时, 测量值的算术平均值接近真值。在实际测量过程中, 若已基本消除了系统误差, 又剔除了粗大误差, 虽有随机误差存在, 但可用多次测量值的算术平均值 \bar{x} 作为测量结果。

2.3.2 标准偏差

在实际测量中, 往往需要知道测量数据的分散程度, 它可以用方差来表示。当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时, 各测量值与数学期望值之差的平方的算术平均值, 或各个测量误差的平方的算术平均值称为方差。其表达式为

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - E_x)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2 \quad (5.2-12)$$

δ_i 取平方的目的是不论 δ_i 是正是负, 其平方总是正值, 求和时不会相抵消; 平方后求和然后再求其平均值, 使个别较大的误差在式中占的比例较大。因此, 可用它衡量测量数据的分散程度, 又能反映个别较大的误差。

将式 (5.2-12) 开方取正方根得

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - E_x)^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (5.2-13)$$

σ 称为标准偏差, 简称标准差。

由于无穷多次测量无法实现, 在实验中是验有限个测量值获得 σ 的估计值, 称为实验标准偏差。在多种估计实验标准偏差值的近似方法中, 贝塞尔公式使用最广泛。其表达式为

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (5.2-14)$$

式中: v_i 为测量列中的各个测得值 x_i 与该测量列的算术平均值 \bar{x} 之差, 称为测量值的残余误差。

实验标准偏差 S 不应与个数为 N ($N \gg n$)、平均值为 E_x 的总体标准偏差 σ 相混淆, 总体标准偏差 σ 由式 (5.2-13) 计算。

在有限次的等精密度测量中, 以算术平均值 \bar{x} 作为测量结果。如果在同一条件下对同一被测量分作 m 组, 每组重复 n 次测量, 每一组的测量列都有一个算术平均值。由于随机误差的存在, 这些算术平均值并不相同, 这说明算术平均值还存在着误差。当需要更精密考虑时, 可用算术平均值的标准偏差来评定测量结果的分散性。

算术平均值 \bar{x} 对整个总体平均值 E_x 的标准偏差, 称为算术平均值的实验标准偏差。可用下式计算

$$S_x = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (5.2-15)$$

2.3.3 随机误差的正态分布

当对同一被测量进行多次测量时, 如果测量误差中仅有随机误差, 由统计理论分析, 它们遵循一定的分布规律。实践可知, 通常可以认为随机误差遵循以下分布规律:

- (1) 绝对值小的误差比绝对值大的误差更容易出现。
- (2) 绝对值相等而符号相反的误差出现的可能性一样。
- (3) 绝对值甚大的误差几乎不可能出现。

上述特点表明该分布是具有单峰性、对称性及有界性的分布, 即随机误差服从于平均值为零的正态分布, 称为高斯误差定律。

随机误差的概率分布密度函数为

$$\varphi(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\delta^2/(2\sigma^2)} \quad (5.2-16)$$

式中: δ 为随机误差; σ 为标准偏差。

由式 (5.2-16) 可知, 标准偏差 σ 一经确定, $\varphi(\delta)$ 就是 δ 的单值函数。如果改变 σ , 则正态分布曲线形状改变。 σ 值愈小, 则曲线形状愈高愈窄, 说明数据愈集中; 反之, σ 值愈大, 则曲线形状愈低愈宽, 说明数据愈分散。

2.3.4 异常数据的剔除

当在测量列中发现异常数据时, 判定其是否为坏值的方法有两种, 即物理判定法和统计判定法。首先应分析物理或工程技术上的原因, 当无法进行这种分析时, 则应按数理统计中的异常数据判断准则来决定取舍。

根据正态分布规律, 某一测量值的误差 δ 越大, 则其出现的概率越小, 数据的分布也在一定的范围内。因此, 可选择—个代表正常数据分布范围的数值, 称为极限误差。所选择的极限误差范围, 称为置信区间。确定极限误差的准则很多, 常用的是拉伊达准则。

拉伊达准则以 3σ 作为极限误差限, 即取 3σ 为正常数据的最大可能值。当某个可疑数据 x_i 的 $|x_i - \bar{x}| > 3\sigma$ 时, 则认为该数据是坏值, 应予以剔除。此方法简单方便, 但只适用于测量次数较多的情况。

根据测量误差落在某置信区间的置信概率计算, 当置信限取 3σ 时, 求得置信概率 $P=0.997$ 。这说明在 1000 次测量中只有 3 次误差的绝对值大于 3σ 。而一般测量次数很少超过几十次, 所以可认为绝对值大于 3σ 的误差是不可能出现的。

2.3.5 测量列的数据处理步骤

假设系统误差已消除, 可以将等精密度测量列的数据处理步骤归纳为以下几步:

- (1) 求出被测量 n 次测量值 (x_1, x_2, \dots, x_n) 的算术平均值 \bar{x} , 即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

- (2) 计算每次测量的残余误差 v_i , 即

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

- (3) 计算每次测量的实验标准偏差 S , 即

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

- (4) 以异常数据判断准则 (如拉伊达准则), 剔除坏值。

(5) 剔除坏值后, 用剩下的数据重新计算 \bar{x} 和 S , 并第二次判断异常数据, 直至剔除所有坏值。

- (6) 计算算术平均值的实验标准偏差 S_x , 即

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

式中： n 、 \bar{x} 为剔除坏值后的测量次数和算术平均值； $x_i - \bar{x}$ 为余下的各次测量的残余误差。

3 仪器仪表误差和准确度

仪器仪表误差表示其测量值偏离真值的程度；而仪器仪表的准确度则表示其测量值接近真值的程度。因此，仪器仪表的准确度越高，它的误差就越小。

3.1 仪器仪表误差

仪器仪表的误差是仪器仪表的一个主要特性。根据误差产生的原因，常用仪器仪表的误差主要有基本误差和附加误差两种。

(1) 基本误差。基本误差是仪器仪表在标准条件下所具有的误差。

标准条件是指温度、波形、频率、电压、功率因数、工作位置及没有外界磁场、电场和铁磁物质影响等条件。这些条件是仪器仪表进行刻度时所必须遵守的，又称为刻度条件。在确定仪器仪表的基本误差时，所有影响仪表指示值的影响量均应符合规定。

基本误差是由仪器仪表本身的内部特性和质量缺陷引起的，其中主要的是装配、摩擦、轴隙、不平衡、标度尺分度、游丝变形及内部电磁场等误差。

(2) 附加误差。附加误差是仪器仪表在非标准条件下所增加的误差。

在使用仪器仪表时，标准条件是经常得不到满足的，当对仪表指示值有一定影响的影响量（如温度、频率、电压、工作位置等）中的某一个，偏离确定基本误差时的额定值时，将会产生附加误差。因此在使用时，仪器仪表误差除本身的基本误差外，还要加上附加误差。

3.2 仪器仪表准确度

准确度亦称精确度，常简称为精度，它反映系统误差与随机误差对测量结果综合影响的程度。

3.2.1 仪器仪表准确度等级

仪器仪表准确度等级是符合一定的计量要求，使其误差保持在规定极限内的仪器仪表的等级。

各类仪器仪表对一定准确度等级下的误差类别和要求有不同的规定方法。

3.2.2 提高测量准确度的方法

为提高测量的准确度，必须减小系统误差和随机误差，剔除粗大误差。在实际测量中，可以从以下几方面具体分析和处理：

(1) 根据实验要求和实验室可提供的测量仪器仪表对测量方法进行优选。在一般情况下，可尽量采用直接测量法；在没有条件直接测量或用间接测量法能得到更准确的测量结果时，应采用间接测量法。

(2) 应配置适当的测量仪器仪表，并对其进行定期检定和校准，通过溯源比较，使仪器仪表的测量结果能够与国家计量基准或国际计量基准联系起来，以保证测量值的准确。

(3) 实验人员应掌握仪器仪表使用方法，选择适当的量程，正确连接测量电路。测量前应对仪器进行必要的零位调节或校准，测量中应避免视差。对较复杂的仪器仪表应按使用说明书进行操作和观测。

(4) 应在仪器仪表规定的工作条件下进行测量，并尽量按标准条件使用，以减小附加误差。

(5) 对已定系统误差可进行修正，如根据仪表检定误差

对测量结果引入修正值，可基本上消除已定系统误差。

(6) 对随机误差较大的测量结果，可以通过在一定条件下重复测量求平均值的方法减小测量误差。

(7) 发现不正常的测量结果应重复测量，剔除粗大误差。

3.3 测量不确定度

测量不确定度是表征被测量的真值所处量值范围的一个评定。

不确定度是误差理论发展和完善的产物，是建立在概率论和统计学基础上的新概念。它表示由于测量误差的影响而对测量结果的不可信程度。测量值在某个区域内以一定的概率分布，表示被测量分散性的参数就是测量不确定度。

测量不确定度可以包括许多分量。按其数值的评定方法可以归并成两类：A 类分量可根据测量结果的统计分布进行估计，并可用实验标准偏差表征；B 类分量根据经验或其他信息进行估计，并可用假设的近似的标准偏差表征。A 类分量与 B 类分量可合成为合成不确定度。扩展不确定度是以合成不确定度的倍数表示的不确定度。

3.3.1 标准不确定度

用概率分布的标准偏差表示的不确定度称为标准不确定度，用符号 u 表示。

因为测量不确定度由许多分量组成，对每个不确定度来源评定的标准偏差，称为标准不确定度分量，用 u_i 表示。标准不确定度有两类评定方法：

(1) A 类标准不确定度。用统计方法得到的不确定度，称为 A 类标准不确定度，用符号 u_A 表示。

A 类标准不确定度可以用下述方法计算。在同一条件下对被测量 x 进行 n 次测量，测量值为 x_i ($i=1, 2, \dots, n$)。计算测量值的算术平均值 \bar{x} ， \bar{x} 为被测量 x 的估计值即测量结果。

x 的实验标准偏差可用贝塞尔公式计算

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$
 (5.2-17)

式中： $n-1$ 称为自由度。

以算术平均值 \bar{x} 作为测量结果时， \bar{x} 的实验标准偏差，即 A 类标准不确定度 u_A 为

$$u_A = S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}}$$
 (5.2-18)

(2) B 类标准不确定度。用非统计方法得到的不确定度，即根据资料或假设的概率分布估计的标准偏差表示的不确定度，称为 B 类标准不确定度，用符号 u_B 表示。

B 类标准不确定度是根据现有信息评定近似的方差或标准偏差以及自由度，分析判断被测量的可能值不会超出的区间 $(\alpha, -\alpha)$ ，并假设被测量的值的概率分布，由要求的置信水平估计置信因子 k ，则 B 类标准不确定度 u_B 为

$$u_B = \alpha/k$$
 (5.2-19)

式中： α 为区间的半宽度； k 为置信因子，通常在 2~3 之间， k 的选取与概率分布有关，正态分布时可查表 5.2-5。

表 5.2-5 正态分布时概率与置信因子 k 的关系

概率 $P(\%)$	50	68.27	90	95	95.45	99	99.73
置信因子 k	0.676	1	1.645	1.960	2	2.576	3

B类标准不确定度评定的可靠性取决于所提供信息的可信程度,在可能情况下应尽量利用长期实际观察的值估计概率分布。多数情况下,只要测量次数足够多,算术平均值的概率分布近似为正态分布。

3.3.2 合成标准不确定度

由各不确定度分量合成的标准不确定度,称为合成标准不确定度,用符号 u_c 表示。

(1) 输入量相关时不确定度的合成。如果被测量 Y 是由其他 N 个输入量 X_1, X_2, \dots, X_N 的函数关系确定,则

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

这些量中包括了对测量结果不确定度有影响的量,并可能彼此相关。若被测量 Y 的估计值为 y ,其他 N 个输入量的估计值为 x_1, x_2, \dots, x_N ,则测量结果为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

测量结果的合成标准不确定度 $u_c(y)$ 为

$$u_c(y) = \left\{ \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} r(x_i, x_j) u(x_i) u(x_j) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.2-20)$$

式中: x_i, x_j 为输入量,一般 $i \neq j$; $\partial f / \partial x_i, \partial f / \partial x_j$ 为 x_i, x_j 的偏导数,称为灵敏系数; $r(x_i, x_j) u(x_i) u(x_j)$ 为输入量 x_i 和 x_j 的协方差估计值; $r(x_i, x_j)$ 为输入量 x_i 和 x_j 的相关系数估计值; $u(x_i)$ 为输入量 x_i 的标准不确定度; $u(x_j)$ 为输入量 x_j 的标准不确定度。

式(5.2-20)为一个通用公式,在实际评定时常可通过一些特例使公式简化,还可以采用去除相关性或使协方差为零等简化问题的方法。

(2) 输入量不相关时不确定度的合成。当影响测量结果的几个不确定度分量相互均不相关且彼此独立时,合成标准不确定度为各标准不确定度分量 u_i 的平方和的根值,即

$$u_c = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.2-21)$$

式中: f 为被测量与各直接测得量的函数关系; $\partial f / \partial x_i$ 为 x_i 的偏导数,称为灵敏系数; $u(x_i)$ 为 A 类或 B 类标准不确定度分量。

当不能写出函数关系时,合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2} \quad (5.2-22)$$

式中: u_i 为第 i 个标准不确定度分量。

3.3.3 扩展不确定度

由合成标准不确定度的倍数表示的不确定度,称为扩展不确定度,用符号 U 表示。

扩展不确定度用合成标准不确定度 u_c 与置信因子 k 的乘积得到,即

$$U = k u_c \quad (5.2-23)$$

式中: 置信因子 k 根据所确定区间需要的置信概率选取。测量值接近正态分布时,一般取 k 值为 2 或 3。通常在工程应用时取 $k=2$ 。

测量结果可表示为 $Y=y \pm U$, y 是被测量 Y 的最佳估计值,被测量 Y 的可能值以较高的概率落在区间 $y-U \leq Y \leq y+U$ 内。

第 3 章 试 验 参 数 的 测 量

在低压电器试验中，需要测量各种试验参数，包括电量参数（如电压、电流、功率、频率、功率因数及时间常数等）、非电量参数（如时间、焦耳积分、温度、磁通、力及长度等）。根据测量的不同要求，需要采用不同的测量方法和仪器仪表。

1 电量参数的测量

1.1 电压测量

电压是表征低压电器额定值和使用类别的基本参数之一。

表 5.3-1 几种测量电压的主要指示仪表和数字万用表的性能

类型	测量基本量	量限	准确度（%）	波形影响	分度特性
磁电系	直流或交流的恒定分量	1mV~1000V ^①	1.0~0.1		均匀
电磁系	直流或交流有效值	10 V~几 kV	2.5~0.2	可测非正弦交流有效值	不均匀
电动系	直流或交流有效值	10 V~几百 V	1.0~0.2	可测非正弦交流有效值	不均匀
整流系	交流平均值	1 V~几 kV	2.5~0.5	测非正弦交流时误差大	接近均匀
静电系	直流或交流有效值	10 V~500 kV	1.5~1.0	可测非正弦交流有效值	不均匀
数字万用表	直流或交流有效值（平均值） ^②	10mV~1kV	1.0~0.1	可测正弦交流有效值	数字显示

① 此处未考虑检流计在内。
② 视数字万用表内的交直流转换电路而定。

（1）直流电压测量。测量直流电压一般选用磁电系电压表或直流数字电压表。这两类仪表指示是平均值响应，在测量有纹波的电压时，能排除交流分量。假如用电磁系或电动系的交、直流两用表测量，由于指示是有效值响应，当纹波含量不为零时，指示值中包含了交流分量。例如，测量单相全波整流电源电压，用交、直流两用电压表比用直流表测量值高 11%，因此，这种电压必须用直流电压表测量。

（2）交流电压测量。测量电压表量程范围内的交流电压，一般用电磁系或电动系交流电压表，也可用交流数字电压表直接测量。三种表相比各有优缺点。

1）交流数字电压表。高准确度的交流数字电压表（如带微处理器的数字电压表）具有准确度高、分辨力强、在测量电路中功率损耗小等优点。其缺点是读数稳定时间较长，并且常用的交流数字表中多数是平均值响应，只适用于测量交流正弦波有效值。

2）电磁系交流电压表。此类表消耗功率较大，但比电动系表要小。其缺点是频带窄，如 45~65Hz。

3）电动系交流电压表。此类表消耗功率最大，但频带

在低压电器试验中，稳态交流和直流电压是最基本的测量参数，低电压通常用电压表并联于被测电路中直接进行测量；而高电压一般可采用电压互感器等电压变换装置进行测量，或采用静电电压表直接进行测量；对于瞬态电压，则必须采用光线示波器或其他记录仪器记录电压波形，进而测量电压值。

1.1.1 中值电压测量

1.1.1.1 中值电压的一般测量

对中值电压（直流 $10^{-4} \sim 10^2$ V，交流 $10^{-3} \sim 10^3$ V）测量一般选用指示仪表，亦可用数字式万用表。几种测量电压的主要指示仪表和数字万用表的性能列于表 5.3-1。

较电磁系表宽，如 45~1500Hz。

1.1.1.2 中值电压的精确测量

对中值电压的精确测量主要采用比较法进行。

精确测量直流电压时，通常采用直流电位差计或数字电压表。用直流电位差计测量直流电压时，不消耗被测线路的能量，测量准确度高，一般可达 $10^{-3}\% \sim 10^{-6}\%$ ；但测量速度较慢。用高准确的数字电压表测量直流电压时，误差可在 $10^{-3}\% \sim 10^{-5}\%$ 范围内，测量速度快。

精确测量交流电压时可采用交、直流比较法，一般是通过交、直流比较仪将交流电压与直流电压进行比较，通过对直流电压的精确测量而达到精确测量交流电压的目的。主要的交、直流比较仪类型有热电式比较仪、电动式比较仪、静电式比较仪及电子变换器等。

1.1.2 高电压测量

（1）直流高电压测量。对直流高电压（ $10^2 \sim 10^6$ V）可采用静电电压表直接测量，也可用电阻分压器来扩大电压表的量限，还可采用其他测量方法，如附加电阻法、直流电压互感器法及电光效应法等。几种测量直流高电压装置的原理及参数列于表 5.3-2。

表 5.3-2 几种测量交、直流高电压装置的原理及参数

方 法	原 理	测量范围	误差（%）	特 点
静电电压表法	作用在两个电极间的静电引力与电极间的电压二次方成正比	500kV	1~2.5	可直接测量高电压
电阻分压器法	高阻值分压电阻，分压电阻上的压降与电阻值成正比	<100kV	>3	视分压器低压臂上跨接的电压表类型，可测量平均值、有效值、最大值
附加电阻法	毫安表和附加电阻串联	<1500V	>1	测量平均值
电压互感器法	互感器一次与二次电压之比等于一次与二次绕组的匝数比	220kV	1~0.5	一次、二次回路电气隔离
峰值电压表法	用高压整流器使电容器充电到被测电压的峰值，由电压表测电容器端电压	几百 kV~ 几千 kV	<3	测量电压峰值

(2) 工频高电压测量。对工频高电压的测量一般要求不高，无论是有效值或峰值，都只要求误差不超过±3%。目前对工频高电压的测量通常是采用电压互感器和电压表来实现的。对超过电压互感器测量范围的高电压，还可用峰值电压表、静电电压表、电容分压器法及电光效应法来进行测量。几种测量工频高电压装置的原理及参数列于表 5.3-2。

1.1.3 瞬态电压测量

测量和记录各种交变的或瞬变的电压常用记录仪器，测量电压峰值还可用峰值电压表。记录仪器的种类很多，目前最通用的是光线示波器，为了适应高频率全自动的测量要求，自动平衡记录仪、瞬态记录仪、动态测试分析记录仪及数字存储示波器等也已广泛使用。

用光线示波器测量误差较大，而且测不到准确的高上升率过电压值。为了准确测量电压瞬时值，用瞬态记录仪或数字存储示波器较好。

1.1.4 低压电器试验中电压的测量

在开关电器接通和分断能力试验中，对试验有影响的电压有四种：空载电压、电弧电压、恢复电压及负载电压。

(1) 空载电压是指试品未通试验电流前的电源电压，它必须等于规定的试验电压。

(2) 电弧电压是指在燃弧时间内触头间出现的电压。

(3) 恢复电压是指分断电流后触头间出现的电压。

(4) 负载电压是指试品通电后加在试品进线端的电压。

空载电压习惯上采用电压表接在试验电路的电源端直接测量，在电压超过 1kV 时，可通过适当变比的电压互感器来测量，也可用光线示波器等来测量其波形。

电弧电压、恢复电压及负载电压都是瞬变和短暂的，所以必须用光线示波器或其他记录仪器测量。试品电弧电压和恢复电压可用同一个电压振子来测量，振子接在试品触头的每一极的进、出线两端，因此测量的是相电压。而测得的波形首先是试品触头从刚断开至电弧熄灭的一段时间内出现的电弧电压，在电弧熄灭后则出现瞬态恢复电压，最后出现工频恢复电压。工频恢复电压通常根据示波图上最后一相熄灭后，第一个周波内触头间电压周期分量的有效值来确定。

负载电压的测量方法与空载电压相同。当负载阻抗接在电源和试品之间时，负载电压近似为零。

在电弧电压、恢复电压的记录测量中，如果被测电压的幅值较大，常使测量仪器不能承受，在这种情况下可采用桥式分压法来测量，其线路如图 5.3-1 所示。在记录测量时只要把 a 和 b 两端接在要测量的位置上即可。图中，R₁、R₂ 是附加的标准电阻，可取 R₁=9R₂，这样，c、d 两点输至

仪器的电压就等于被测电压信号的 1/10，c、d 两点的对地电压只等于被测电压的 1/20。

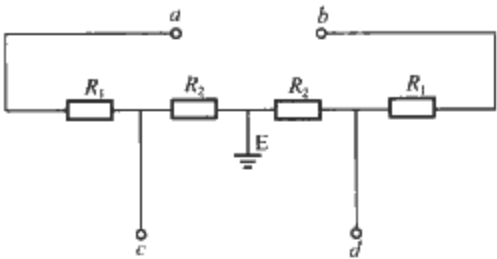


图 5.3-1 测量电压用桥式分压电路

要确定电压波形图中的电压值，必须拍摄标准电压波形，用标准波形与测得的电压波形相比较来确定实际电压波形的值。下面介绍拍摄标准电压波形的方法：拍摄交流电压标准波的电源可采用调压器或调压器带一升压变压器。在变压器的输出端接一只电压表，同时测量电压振子的信号也取自变压器的输出端，调节调压器，使电压表读数与试验电压值相同；调节振子回路中的电阻 r，使波形幅度大小适中，拍下标准电压波形，同时记录下此时的电压表读数 U_B（有效值），则此标准电压波形的峰—峰值尺寸 y 代表的电压有效值为 U_B。然后用拍摄标准波时的振子和振子回路中调节电阻去拍摄要测量的电压 U_x，若此时记录下电压波形峰—峰值尺寸为 x，则 U_x（有效值）=xU_B/y。

拍摄直流电压标准波时，标准电源可使用三相调压器和三相升压整流变压器，然后经过三相全波整流组成一个可调直流电源。拍摄回路的接线、波形调节及电压值计算同交流电压。

1.2 电流测量

电流是表征低压电器额定值和使用类别的基本参数之一。低压电器的短路特性均用电流值来表示。在低压电器试验中，电流值变化范围很大，由零点几安到几万安。稳态交流和直流电流是最基本的测量参数，小电流通常用电流表串接于被测电路中直接进行测量，而大电流一般可采用电流互感器等电流变换装置进行测量。对于瞬态电流，则必须采用光线示波器或其他记录装置记录电流波形，进而测量电流值。小电流可将光线示波器振子通过分流箱串入电路中直接记录、测量；而大电流往往通过低感分流器配合记录仪器进行记录、测量。

1.2.1 中值电流测量

1.2.1.1 中值电流的一般测量

对中值电流（直流 10⁻⁶~10² A，交流 10⁻³~10³ A）测量一般选用指示仪表，亦可用数字式万用表。几种测量电流的主要指示仪表和数字万用表的性能列于表 5.3-3。

表 5.3-3 几种测量电流的主要指示仪表和数字万用表的性能

类型	测量基本量	量限	准确度 (%)	波形影响	分度特性
磁电系	直流或交流的恒定分量	1μA~几十 A ^①	1.0~0.1		均匀
电磁系	直流或交流有效值	1mA~100A	2.5~0.2	可测非正弦交流有效值	不均匀
电动系	直流或交流有效值	10 mA~几十 A	1.0~0.2	可测非正弦交流有效值	不均匀
整流系	交流平均值	10μA~几十 A	2.5~0.5	测非正弦交流时误差大	接近均匀
数字万用表	直流或交流有效值（或平均值） ^②	10 mA~几 A	1.0~0.2	可测正弦交流有效值	数字显示

① 此处未考虑检流计在内。
② 视数字万用表内的交直流转换电路而定。

(1) 直流电流测量。测量直流电流一般应使用磁电系直流电流表或直流数字电流表。在电流较大，如 100A 以上时，受电流表量程所限通常不能直接测量，一般用分流器和直流毫伏表测量。但是在试验验证直流电流的有效值效应

时，应另行考虑。如用单相全波整流电源供电进行主电路温升试验，电流有效值与平均值之比最高可达 1.1，这种情况用交、直流两用电流表测量更为合理。假如是三相全波整流电源，电流有效值与平均值之差可以忽略不计。

(2) 交流电流测量。测量工频稳态电流可用电磁系或电动系交流电流表或交流数字电流表。三类仪表的优缺点对比基本上与电压表相同。在低压电器试验中,最常用的是电磁系交流电流表。

被测电流值超过电流表量限时,需用电流互感器扩大量程,使用时应注意电流互感器额定阻抗与电流表阻抗的匹配。

1.2.1.2 中值电流的精确测量

对中值电流的精确测量主要采用比较法进行。在精确测量直流电流时,通常采用直流电位差计或直流数字电压表;精确测量交流电流时可采用交、直流比较法。直流电位差计测量电流的范围为 $10^{-7} \sim 10^4 \text{ A}$,数字电压表测量范围为 $10^{-7} \sim 10^2 \text{ A}$ 。

被测电流 I_x 流经标准电阻 R_s ,并在其上产生电位差 U_x ,用电位差计或数字电压表测该电位差,即可求得被测电流 $I_x = U_x / R_s$ 。

测量时应注意:通过标准电阻的电流值不应超过标准电阻的允许功耗;标准电阻的电流端接被测电流,电位端接直流电位差计或直流数字电压表。

1.2.2 直流大电流测量

测量直流大电流可用扩大量程装置来扩大测量仪器仪表的量程,或用专门的大电流测量仪来测量。按照工作原理可分为两类:一是根据被测电流在已知电阻上的电压降来进行测量;二是根据被测电流所建立的磁场来进行测量。几种测量直流大电流装置的原理及参数列于表 5.3-4。

表 5.3-4 几种测量直流大电流装置的原理及参数

方法	分类	原理	测量范围	误差 (%)
分流器法	根据被测电流在已知电阻上的电压降进行测量	通过分流器的电流与分流器上的电压降成正比	$<10\text{kA}$	0.5
直流互感器法	根据被测电流所建立的磁场进行测量	以辅助交流电压产生的交流磁通势来平衡被测电流产生的直流磁通势	$1 \sim 100\text{kA}$	0.5~1
磁位计法		测量被测电流所建立的磁通势	100A	0.1

1.2.3 工频和瞬态大电流测量

工频大电流测量常用互感器法,也可用磁位计法、磁光效应法等。

瞬态大电流是快速变化的强电流,具有幅值大、作用时间短的特点,测量这种电流的装置应该有足够宽的频响范围、足够大的过载能力和抗干扰能力。对瞬态大电流的测量常用分流器法和磁位计法。几种测量工频和瞬态大电流装置的原理及参数列于表 5.3-5。

表 5.3-5 几种测量工频和瞬态大电流装置的原理及参数

方法	原理	测量对象	测量范围	误差 (%)
电流互感器法	互感器一次与二次电流之比等于二次与一次绕组的匝数比	工频大电流	$<10\text{kA}$	1~0.01
磁位计法	测量由被测电流变化所产生的感应电动势	工频或瞬态大电流	$100\text{A} \sim \text{几十 kA}$	1~0.1

续表

方法	原理	测量对象	测量范围	误差 (%)
磁光效应法	偏振光振动面旋转的角度正比于晶体处的被测电流所产生的磁场强度	工频或瞬态大电流	几 kA	1~5
分流器法	通过分流器的被测电流与分流器上的电压降成正比	瞬态大电流	几十 A~几 kA	0.5~1

1.2.4 低压电器试验中电流的测量

开关电器接通和分断能力试验的电流分为预期电流和实际通断电流两种。

(1) 预期电流是指试验电路中试品未接入时或用阻抗可以忽略不计的导线把试品进、出线端短接后的试验电路电流。

(2) 实际通断电流是指把试品接入试验电路进入通断试验时所实际接通和分断的电流。

由于试品触头系统都具有一定的阻抗,所以试品实际通断的电流要比预期电流小。如果试品是快速开关或限流开关,则由于分断时电弧电压的限流作用,实际通断电流可能比预期电流要小很多。但应注意,国家标准中规定的试验电流是指预期电流,即试品通断试验合格后是根据预期电流的大小来确定试品的通断能力,而不是根据试品实际通断的电流大小来确定。下面介绍两种常用的测定电流的方法。

1.2.4.1 用电流表测量

在试验电路中,电流表通过电流互感器串联于交流试验电路(在试验电流很小时,可把电流表直接串联于试验电路中),其接线图如图 5.3-2 所示。

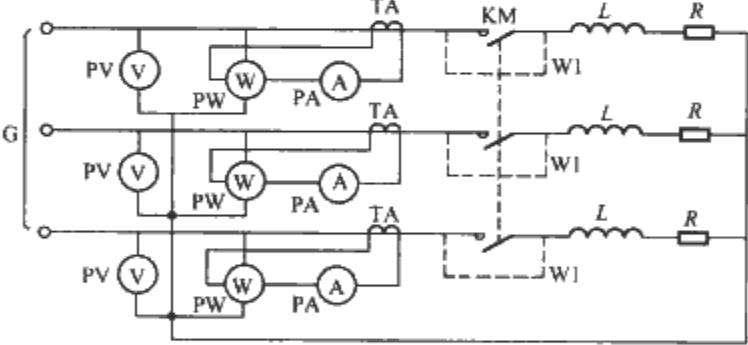


图 5.3-2 用电流表测量试验电路电流

PV—电压表;PW—低功率因数功率表;PA—电流表;
TA—电流互感器;KM—被试电器;W1—整定用临时连接线;
L—试验回路电抗器;R—试验回路电阻器;G—低电压电源

在调节电流时,被试电器不接入而用阻抗可忽略的金属导体短接,调节负载阻抗使试验电流为要求值。图中接入的低功率因数功率表用于测量试验回路的功率因数,显然用电流表测得的是预期电流的稳态值,因此它不适用于测量短路接通能力试验的预期电流。由于读数时间较长,要求试验变压器和负载阻抗具有足够的容量,不致因发热而温升过高造成测量误差。因此,此方法只适用于试验电流不大的情况。

1.2.4.2 用光线示波器拍摄电流波形来确定试验电流值

使用光线示波器拍摄预期电流波形时,由于试验回路中电流都很大,通常都需要一个电流传感器,用传感器的输出信号作为拍摄电流波形振子的输入信号。电流传感器有很多种,通常采用低感分流器和电流互感器。使用光线示波器来测量电流值时和测量电压时一样也必须拍摄标准波。下面介绍使用低感分流器时如何拍摄电流标准波。

低感分流器直接串联在试验主电路中,它的作用相当于一个采样电阻,当试验电流流过分流器时会产生一定的压降,用此压降作为示波器拍摄电流波形的输入信号。

由于分流器是以电压形式作为输出信号,所以在拍摄电流标准波时可使用一个可调电源作为拍摄电流标准波的输入信号。因为试验电源有交、直流之分,所以在拍摄电流标准波时也需要交流和直流两种电源。拍摄交、直流电流标准波形的电路如图 5.3-3 所示。

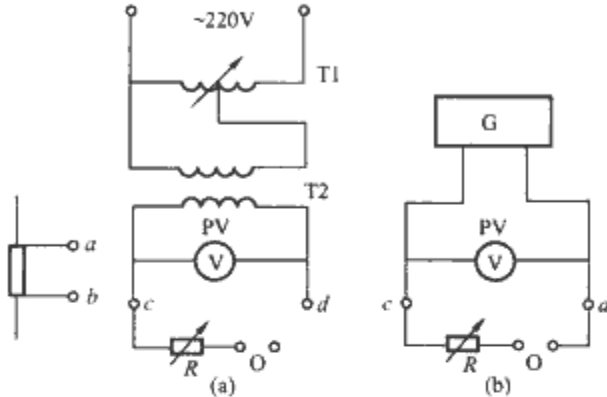


图 5.3-3 采用低感分流器与光线示波器配合作为拍摄电流标准波形的电路

(a) 拍摄交流电流标准波形的电路;

(b) 拍摄直流电流标准波形的电路

T1—自耦调压器; T2—降压变压器; PV—高精度数字式电压表; R—可调电阻器; O—光线示波器的振子;

G—可调直流稳压电源

在拍摄交流电流标准波时,可以用调压器和降压变压器组成可调电源,此电源的内部连接方式为:用 220V 电源输入调压器,调压器的输出端与降压变压器的一次侧相连接,而变压器的二次侧两端作为电源的输出端(由于分流器在通过额定电流时其压降通常设计为 3V,所以变压器可设计成一次电压 220V,二次电压 3V)。在拍摄标准波时,在变压器的二次侧两端接一高精度数字电压表,另外把光线示波器中拍摄电流波形的振子接在变压器二次侧的一端,另一端与电阻器 R 串联后接至变压器二次侧的另一端上。

根据试验电流值,可计算出试验电流流过分流器时分流器的压降。如果试验电流为 I_c (有效值),分流器上的电压降为 U_f (有效值),则调节调压器使得电压表上读数也为 U_f (有效值),调节好振子回路中的电阻器 R 使得波形幅值大小适中,然后拍摄下此电流波形,则此波形就是标准电流波形,其波形的峰—峰值的尺寸为 y 。然后再测量试验回路中的电流 I_x (注意:此时,振子及振子回路中的电阻器 R 不能变动)。如果拍摄出电流波形的峰—峰值尺寸为 x ,则试验回路中实际电流(有效值)为

$$I_x = \frac{x}{y} I_c$$

在拍摄直流电流标准波时,标准波的电源可采用晶体管可调直流稳压电源。拍摄直流电流标准波的接线方式与拍摄交流电流标准波相同。如果试验电流为 I_c ,分流器上的电压降为 U_f ,调节可调直流电源使电源输出电压也为 U_f ,然后调节好波形大小,若拍摄下标准波的幅值尺寸为 y ,而实际试验回路中的电流波形的幅值尺寸为 x ,则此时试验电流为

$$I_x = \frac{x}{y} I_c$$

1.2.4.3 示波图分析

下面以单相交、直流额定接通和分断能力试验示波图为例介绍怎样在示波图上测量各种参数。

(1) 单相交流额定接通和分断能力试验示波图如图 5.3-4 所示。

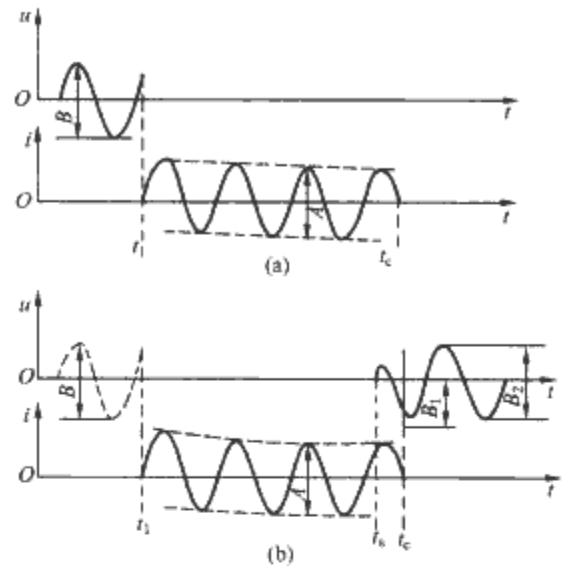


图 5.3-4 单相交流额定接通和分断能力试验示波图

(a) 额定接通能力试验示波图;

(b) 额定分断和通断能力试验示波图

1) 额定接通能力试验示波图。试验接通电压 $U = B/2\sqrt{2}$; 接通电流 $I = A/2\sqrt{2}$; 接通电流通电时间 $t = t_c - t_1$; t_1 为试品接通电路瞬间; t_c 为试品开关断开电路瞬间。

2) 额定分断和通断能力试验示波图。试验接通电压 $U = B/2\sqrt{2}$, 图中虚线电压波形在进行通断试验时才出现,分断试验时无接通电压;工频恢复电压 $U_r = B_2/2\sqrt{2}$; 过电压 $U_1 = B_1/\sqrt{2}$; 分断(通断)电流 $I_c = A/2\sqrt{2}$; 试品通电时间 $t = t_c - t_1$; 试品燃弧时间 $t = t_c - t_s$; t_1 为试品开关接通电路瞬间(在进行通断试验时则电路由试品本身接通); t_c 为试品断开电路瞬间。

对于多极电器,其燃弧时间应为最先一相出现电压波形时刻起至最后一相电流为零时刻止的这段时间。

(2) 单相直流额定通断能力试验示波图如图 5.3-5 所示。

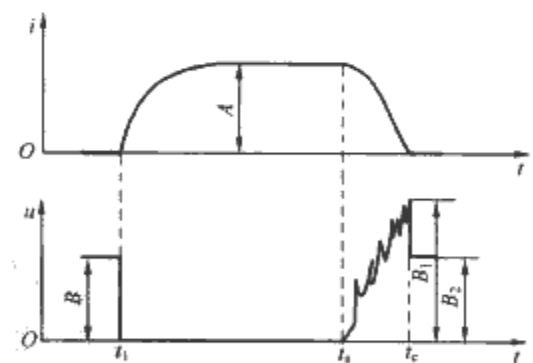


图 5.3-5 单相直流额定接通和分断能力试验示波图

试验接通电压 $U = B_1$; 通断电流 $I_c = A$; 恢复电压 $U_r = B_2$; 过电压 $U_1 = B_1$; 试品通电时间 $t = t_c - t_1$; 试品燃弧时间 $t_i = t_c - t_s$; t_1 为试品接通电路瞬间; t_s 为试品触头开始断开瞬间; t_c 为试品触头断开电路瞬间。

1.3 功率测量

功率是表征电器额定值的基本参数之一。功率测量可以采用直接或间接测量方法。直接测量法一般采用指示仪表、数字仪表及微机化仪器直接测量;间接测量法常采用指示仪

表、交直流电位差计、交直流比较仪等测量。

1.3.1 直流功率测量

几种直流功率的测量方法及其常用仪器仪表、测量范围、误差列于表 5.3-6。

表 5.3-6 直流功率测量方法

测量方法		常用仪器仪表	测量范围	误差 (%)
直接测量	指示仪表法	功率表	0.025~10A, 0~600V	2.5~0.1
	数字仪表法	数字功率表	0~10A, 0~600V	1~0.05
	微机化仪器	带微机的数字功率表	0~5A, 0~600V	0.5~0.01
间接测量	指示仪表法	电流表和电压表	0.1mA~50A, 0~600V	2.5~0.2
	补偿法	直流电位差计	由分压器、分流器决定	0.1~0.005

(1) 指示仪表法直接测量功率。测量直流功率大多采用电动系功率表，这种仪表通常是交、直流两用表。

功率表必须遵守“发电机端”的接线原则。电流支路和电压支路标有“±”、“*”或“↑”符号的一端称为发电机端，电流支路的发电机端必须接到电源一侧，另一端接到负载端；电压支路的发电机端可以接到电流端钮的任一端钮上，电压支路的另一端必须接到负载的另一端。

测量直流功率还可采用利用霍尔效应制成的霍尔变换器式功率表。

(2) 数字仪表法。测量直流功率的数字功率表，通常有两类：一类是具有模拟乘法器的数字功率表；另一类是计算式数字功率表。

具有模拟乘法器的数字功率表通常是交、直流两用表。计算式数字功率表是借助于微处理机的计算功能，用数字方法完成电压、电流的处理。计算式数字功率表不仅用于测量功率，还可以测量其他参数，如无功率、视在功率等。

(3) 指示仪表法间接测量功率。指示仪表法间接测量直流功率也称为电流表、电压表法，它是用电流表和电压表进行直流功率测量的，在单相交流功率测量中也可用此方法。

用电流表和电压表测量直、交流功率的连接方式与用功率表直接测量有相似之处，电流表相当于电动系功率表的电流支路，电压表相当于电动系功率表的电压支路，因此接线原则也与电动系功率表相同。它是测量功率的电压分量 U 和电流分量 I ，计算出功率 $P=UI$ 。用电流表和电压表间接测量功率，不如应用功率表简便，测量结果也不如功率表准确。

1.3.2 单相交流功率测量

几种单相交流功率的测量方法及其常用仪器仪表、测量范围、误差列于表 5.3-7。

表 5.3-7 单相交流功率测量方法

测量方法		常用仪器仪表	测量范围	误差 (%)
直接测量	指示仪表法	附变换器式功率表	0~5A, 0~600V, 内附 TA、TV	5~2.5
	数字仪表法及微机化仪器	数字功率表	0~5A, 0~600V, 内附 TA、TV	0.5~0.01

续表

测量方法		常用仪器仪表	测量范围	误差 (%)
间接测量	指示仪表法	电流表和电压表	$10^{-4} \sim 10^2 \text{ A}$, $10^{-3} \sim 10^5 \text{ V}$	2.5~0.3
	补偿法	交流电位差计	$10^{-4} \sim 2 \text{ V}$	0.5~0.1
	交、直流比较仪法	交、直流比较仪	0.05~10A, 15~600V	0.05~ 10^{-5}

(1) 指示仪表法。测量单相交流功率除采用电动系或铁磁电动系功率表外，还可采用附变换器式功率表，功率变换器目前使用最多的有三类：具有平方特性的变换器、时分割乘法器变换器及热电变换器。

一般功率表的额定功率因数等于 1（即 $\cos\varphi_N=1$ ）。当 $\cos\varphi_N<1$ 时，称为低功率因数功率表，常见的有 $\cos\varphi_N=0.5$ 、0.2 及 0.1，这种功率表用于测量功率因数较低的交流电路的功率。

(2) 数字仪表法。测量单相交流功率可以采用交、直流两用数字功率表。从原理上仍可分为具有模拟乘法器的数字功率表与计算式数字功率表。带有微处理机的数字功率表即为通常所称的微机化仪器。

(3) 指示仪表法间接测量功率。用多个指示仪表可以间接测量单相交流功率。例如，用电压表、电流表和功率因数表可以测量负载的电压 U 、电流 I 和功率因数 $\cos\varphi$ 后，即可按有功功率 $P=UI\cos\varphi$ 计算出被测功率。

1.3.3 三相交流功率测量

几种三相交流功率的测量方法及其常用仪器仪表、测量范围、误差列于表 5.3-8。

表 5.3-8 三相交流功率测量方法

测量方法		常用仪器仪表	测量范围	误差 (%)
直接测量	指示仪表法	三相功率表	0.025~10A, 0~1kV	2.5~0.1
	数字仪表法	数字功率表	0~5A, 0~1kV	0.1~0.01
间接测量	一表法 二表法 三表法	单相功率表	0.25~10A, 0~1kV, 内附 TA、TV	2.5~0.1

(1) 指示仪表法直接测量功率。测量三相交流功率多采用三相功率表。三相功率表有两种结构：一种是二元三相功率表；另一种是三元三相功率表。前者适于测量交流三相三线制电路的功率；后者适于测量交流三相四线制电路的功率。

(2) 指示仪表法间接测量功率。三相功率测量可用三个单相功率表、两个单相功率表或一个单相功率表测量。

1) 一表法。一表法适用于三相对称系统。所谓对称系统就是三相电压对称、各相负载大小相等，则各相电流对称，电流与电压间的相位差相等。三相对称系统可用一个单相功率表来测量单相功率 P_0 ，则三相系统总功率 $P=3P_0$ 。

2) 二表法。二表法能够适用于三相三线不对称系统。所谓不对称系统就是三相电压不对称或各相负载不相同，则一般各相电流是不对称的，电流与电压间的相位差也不相等。不对称的三相三线系统可用两个单相功率表来测量功率。每个功率表单独的指示没有任何意义，只有两个功率表指示的代数和才表示三相总功率。若两功率表测量值分别为

P_1 、 P_2 ，则三相系统总功率 $P=P_1+P_2$ 。

3) 三表法。三相四线不对称系统，必须用三个单相功率表来测量功率。每个单相功率表测出一相功率，分别为 P_1 、 P_2 、 P_3 ，则三相系统总功率 $P=P_1+P_2+P_3$ 。

1.4 频率测量

频率是表征交流电器额定值的基本参数之一。在电磁测量中由于被测频率较低，一般可采用指示仪表、数字仪表直接测量，也可用电桥法、示波器法等测量。

几种频率的测量方法及其常用仪器仪表、测量范围、误差列于表 5.3-9。

表 5.3-9 频率测量方法			
测量方法	常用仪器仪表	测量范围	误差(%)
指示仪表法	电动系频率表	45~55Hz、900~1100Hz、1350~1650Hz、100~380V	1.5~0.5
	变换式频率表	45~55Hz	1.5~0.5
	谐振式频率表	45~1500Hz	0.5~1
数字仪表法	数字频率计	几 Hz~几百 MHz	
电桥法	各种电桥及万用电桥		0.5~1
示波器法	示波器	与示波器指标一致，能测高频	0.5

(1) 指示仪表法。频率的测量较多采用电动系频率表，还可以采用磁电系附变换器式频率表，变换器的作用是将被测频率转换为一定大小的直流电流，然后由磁电系表头进行测量。将频率转换为直流电流的方法很多，比较常用的是采用微分型变换器频率表。

谐振式频率表是一种结构简单的频率表，又称为振动式簧片型频率表，它是由一组调谐的振簧构成的测量频率的仪表。其结构包括电磁铁、衔铁和簧片三部分，每个簧片都有一个固定的机械振动频率。当频率表接通被测电源时，电磁铁产生一个与电源频率相同的交变磁场，衔铁在交变磁场的作用下产生振动，并把振动传给簧片。如果簧片的固有振动频率与电源频率相同，则该簧片产生共振，因此可从产生共振簧片的标志读出被测频率值。谐振式频率表适用于工频测量，也可用来监视工频频率的微小变化。这种频率表的缺点是对机械振动敏感，不能用在有振动的场合。

(2) 数字仪表法。测量频率可以采用数字频率计。数字频率计是一种新型的测频仪器，它有很多优点，如频率值由数字直接显示而避免了读数误差、可以快速自动测量、有代码输出及便于打印结果等。数字频率计既可测量正弦信号的频率，也可测量脉冲信号的频率，还能测量正弦或脉冲信号的周期、脉宽、频率比等。

数字频率计实际上就是电子计数器，它是通过脉冲计数方法“数出”在给定时间间隔内所经过的被测信号振荡周期数而测出频率的。

(3) 电桥法。频率电桥是一种交流电桥，它的特点是电桥的平衡条件与电源的频率有关。如果把被测频率的电压供给电桥，在调节电桥达到平衡后，可由平衡条件确定其频率。

1.5 功率因数测量

交流电路中的功率因数是表征电器使用类别的基本参数之一，其值直接影响开关电器的分断性能。

交流电路中的功率因数是指同频率正弦交流电压和电流的有功功率 P 和视在功率 S 之比。即功率因数

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI} \tag{5.3-1}$$

式 (5.3-1) 表明，功率因数是正弦交流电压和电流之间的相位差角 φ 的余弦。由于在数学上 $\cos\varphi$ 与 φ 有一一对应的关系，即已知 φ 就可知 $\cos\varphi$ 的大小，所以相位的测量方法均适用于功率因数的测量。

1.5.1 功率因数的一般测量

功率因数的测量一般采用指示仪表、数字仪表直接或间接测量；也可采用示波器用波形图法直接比较在荧光屏上得到的波形图，由读出的分度值求得相位差，进而可得功率因数。

(1) 指示仪表法。功率因数的测量可以用电动系相位表（功率因数表），分为单相相位表和三相相位表两种。单相相位表的接线与功率表相似，也有四个接线端钮，其中两个为电流端钮，两个为电压端钮（当电流、电压量限不是一个时，则端钮更多一些，接线时要注意选用）。在电流和电压的一个端钮上分别标有“发电机端”的特殊标记，它的接线方法与功率表完全相同。

(2) 数字仪表法。功率因数的测量也可以用数字相位表（功率因数表）来实现，数字相位表的关键部件是相位转换器。相位转换器有许多类型，如瞬时值相位转换器、平均值相位转换器及相位—电压转换器等。

(3) 指示仪表法间接测量功率因数。用交流电流表、电压表和功率表能间接测定两个正弦信号之间的相位角 φ 或功率因数 $\cos\varphi$ 。

1) 在单相电路中，若分别测出电路中相应的 U 、 I 、 P 值，按式 (5.3-1) 可计算出功率因数 $\cos\varphi$ ；进而可算出相位角 φ 。

2) 在三相电路中，当电路对称时有

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3}UI} \tag{5.3-2}$$

因此，在测得三相有功功率 P 的同时，用电压表和电流表同时测得三相电路的线电压 U 和线电流 I ，按式 (5.3-2) 可求出功率因数 $\cos\varphi$ ；进而可求出相位角 φ 。

3) 在三相电路中，当电路不对称时，若测得三相电路总有功功率 P 和总视在功率 S ，按式 (5.3-1) 可求得功率因数 $\cos\varphi$ ；进而可求得相位角 φ 。

1.5.2 低压电器试验中功率因数的测量

在开关电器接通和分断能力试验中，交流试验电路的电流、电压波形为正弦时，其功率因数为试验电源电压 U （空载电压）与试验电流 I 之间相位角 φ 的余弦。若试验电源采用试验变压器时，功率因数即为变压器二次侧空载电压 U_0 与电流 I 之间相位角 φ 的余弦，在理论上应等于 R/Z ，即

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}} \tag{5.3-3}$$

式中： Z 为试验回路总阻抗； R 为试验回路总电阻， $R=R_1+R_2+R_3$ ，其中 R_1 为被试电器之前所接之电阻（包括所有接线电阻）； R_2 为被试电器之后所接之电阻； R_3 为电源内阻； X 为试验回路总电抗， $X=2\pi fL=2\pi f(L_1+L_2+L_3)$ ，其中 L_1 为被试电器之前所接电抗器之电感， L_2 为被试电器之后所接电抗器之电感， L_3 为电源内电感， f 为电源频率。

当试验电源采用试验变压器时，电源内阻 R_3 应为变压器二次电阻 r_2 与一次折算到二次电阻 r_1 之和； L_3 应为变压器二次电感 L_2 与一次折算到二次电感 L_1 之和。

当 R 和 L 为常数时, 功率因数也可用电路总有功功率 P 和总视在功率 S 之比来表示, 即

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (5.3-4)$$

低压电器试验中功率因数的测量方法有多种, 下面介绍几种常用的测量方法。

(1) 直接测读法。直接测读法是在试验电路中直接接入低功率因数表或电压表、电流表和低功率因数功率表, 在通电情况下直接测量功率因数。测量时, 电压信号取自变压器的二次侧, 电流信号取自串联在电路中的电流互感器, 其接线方式如图 5.3-2 所示。

在图 5.3-2 中每相的 $\cos\varphi$ 值可按式计算

$$\cos\varphi = \frac{P}{IU} \quad (5.3-5)$$

式中: P 为功率表的读数; I 为电流表的读数; U 为电压表的读数。

由图 5.3-2 可知, 电压表和功率表的电压线圈都是接在变压器的低压侧, 当电流通过试验回路时, 电压表所测得的已不是空载电压 U , 而是比空载电压小一些的负载电压; 功率表所测得的也不是全电路的有功功率 P , 而只是变压器低压侧电路中的总电阻 R 所消耗的功率 P' , 而未包括变压器内阻抗和电网的阻抗所消耗的功率在内。因此, 此方法所测得的 $\cos\varphi$ 实际上只是负载电路的功率因数, 而不是全电路的功率因数。

由于功率表测得的 P 中没有包括电源内阻消耗的功率, 电压表测得的不是空载电压, 因此, 当电源内阻抗和负载阻抗之比大于一定数值时会引起很大的误差。

如果在通电测量过程中, 变压器二次侧的电压降大于 10% 或变压器二次侧以前的功率因数高于试验电路的功率因数, 则应根据变压器的短路阻抗数据对测得的功率因数进行计算校正。

另外, 此法通电时间较长, 主电路中负载阻抗和连接导线要受到发热的限制, 当试验电流较大时, 负载阻抗和连接导线会严重发热 (因为在通断试验中, 特别是大电流情况, 试验通电时间很短, 一般为 100ms 左右, 所以负载阻抗和导线在设计时都考虑为短时工作制), 引起负载阻抗增大造成测量误差, 所以此方法一般适用于试验电流不大的情况。

如果使用功率因数表或相位表来测量功率因数, 则可在功率因数表或相位表中直接读取 $\cos\varphi$ 或 φ 值, 其接线方式同功率表。

(2) 低电压推测法。低电压推测法是在电源变压器的一次侧施加一低电压, 用仪表直接测量功率因数。测量时, 外施低电压电源的电压应尽可能高, 以消除附加的测量误差。测量仪表接在电源端, 对于三相系统, 一般采用电压表、电流表和低功率因数功率表测量, 测量的是三相功率因数的平均值。其测试电路如图 5.3-6 所示。

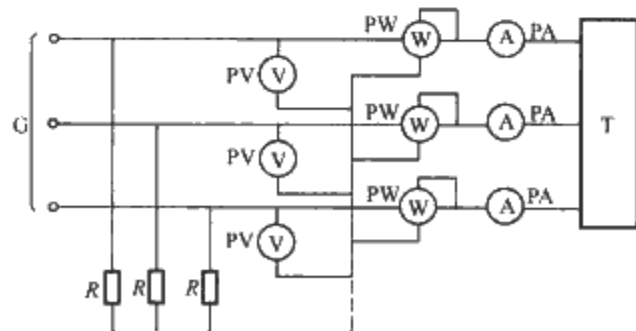


图 5.3-6 低电压法测功率因数电路图

G—低电压电源; R —电阻器; PV—电压表; PW—低功率因数功率表; PA—电流表; T—冲击变压器

这种测量方法的三个功率表的电压线圈必须有一个公共点, 而且这三个电压线圈的阻抗必须相等。如果不能满足此要求, 则应接入一个人为中性点, 它的阻抗应低于功率表电压线圈的阻抗。每相的 $\cos\varphi$ 值根据各表读数按式 (5.3-5) 计算得出。

上述方法实质上忽略了电网部分的阻抗, 只适用于电网短路容量与试验容量之比大于 10 的情况。如果不能满足, 则可以采用以下两种方法之一加以补偿:

1) 根据电网部分的电阻、电抗数据和测量的电压、电流值, 对功率因数值进行计算校正。

2) 按电网阻抗数据在变压器的前面接入一附加阻抗, 并将电压表、低功率因数功率表的电压线圈接在附加阻抗的前面进行测量。

由于低电压法在试验电路中呈现甚低电压, 因而受诸如磁效应和接触压降的非线性等因素的影响不可能达到较高的精度。

(3) 相角差法。相角差法是通过测定电源电压 (空载电压) 与电流的周期分量之间的相角差来确定功率因数的。电流信号取自电流互感器, 电压信号取自电源的输入端 (即电源变压器的一次侧), 此方法只要在拍摄预期电流的同时拍摄空载电压, 然后在此示波图上取两者的相角差 φ 即可。但实际上功率因数定义中的 φ 角是空载电压与电流中的周期分量 (即全电流中直流分量消失后呈对称的电流) 之间的相位角。由于电源空载电压在接通电路以后便不存在, 而全电流中直流分量消失后呈对称电流波形又需要一定的时间, 所以采用这种方法就必须将电路接通或断开后的空载电压波形向前或向后推移至与对称电流相遇, 然后才能量取其相角差。如果直接从示波图上测量它们之间的相角差, 很难获得准确的值。为此可采用下面方法来解决: 在试验电源变压器的一次侧接一个精度等级较高的电压互感器, 预先测定其输出电压 (带规定负载的情况下) 与输入电压之间的固有相角差。试验过程中的电压信号取自这一互感器的输出端, 将这个电压波形与直流分量已消失后的电流波形相比较, 量取其过零相角差, 然后用此相角差换算到电源变压器一次侧电压与电流间相角差, 便可获得 $\cos\varphi$ 值。由于此方法是通过测量 φ 角来计算 $\cos\varphi$ 值的, 而测量 φ 角时难免会引起误差, 因此, 在示波图上测量时要十分小心精细。此外, 还要求拍摄波形时走纸速度要尽量快 (一般控制示波器走纸速度在 1m/s 以上), 并保持速度均匀。如果采用能将波形作足够拓宽的记忆示波器或其他类型的瞬态记录仪, 则测量精度可以大大提高。

采用相角差法测定功率因数的一种先进方法, 是采用电子或数据处理系统和数字电路。这个系统在电路接通以前首先将空载电压中的过零相位和半波时差采集下来, 并加以锁定, 然后在电路接通后以设定的脉冲无偏移地向前推进。对电流信号同样采集过零脉冲, 当电流已达到稳定和对称状态时 (通电以后大于 5 个周波), 比较这两个脉冲信号, 便可获得功率因数角。

相角差法的优点是电路的功率因数在很大范围内都能测量, 缺点是未计入电网部分的阻抗对功率因数的影响。因此, 严格来说不能认为此方法测得的是全电路功率因数。但是, 如电网短路容量比试验容量大 10 倍以上, 则电网阻抗的影响一般可忽略不计, 可直接采用这种方法。当电网短路容量与试验容量之比小于 10 时, 则应对输入电压信号进行相位校正。校正的方法是将电压信号按电网部分的 R 、 X 值进行固定角度的移相, 或者不采用移相的方法而对上述测试

的数据进行计算校正,从而补偿电源阻抗所产生的相角偏差。

(4) 直流分量法。直流分量法适用于 $\cos\varphi$ 不大于 0.35 的场合。根据所拍摄的短路初始过程的全电流波形(如图 5.3-7 所示)来确定功率因数值。方法有两种:

1) 预期电流 i 实际上由周期分量(交流分量)和非周期分量(衰减的直流分量)两部分组成。其中非周期分量电流 i_d 在理论上可用下式表示

$$i_d = I_{d0}e^{-\frac{t}{T}} \tag{5.3-6}$$

式中: I_{d0} 为 i_d 的初始值; T 为试验电路全电路的时间常数。

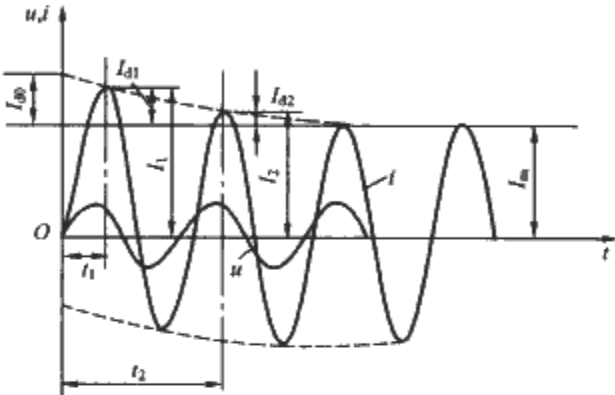


图 5.3-7 通断能力试验电路功率因数的图解测量
 I_1 、 I_2 —第一个和第二个周波的全电流峰值; t_1 、 t_2 —与 I_1 、 I_2 相对应的时间; I_{d1} 、 I_{d2} —在 t_1 和 t_2 瞬间的直流分量; I_m —电流周期分量的峰值

根据全电流波形,分别量取第一个与第二个电流峰值(I_1 、 I_2)和相应的时间(t_1 、 t_2)以及电流周期分量(即达到稳态的电流)峰值 I_m 。对应于时间 t_1 和 t_2 的直流分量 I_{d1} 和 I_{d2} 为

$$I_{d1} = I_1 - I_m$$

$$I_{d2} = I_2 - I_m$$

根据式 (5.3-6) 可以得到

$$I_{d1} = I_{d0}e^{-\frac{t_1}{T}}$$

$$I_{d2} = I_{d0}e^{-\frac{t_2}{T}}$$

把上面两式相除可得

$$\frac{I_{d1}}{I_{d2}} = \frac{e^{-\frac{t_1}{T}}}{e^{-\frac{t_2}{T}}} = e^{\frac{(t_2-t_1)}{T}} \tag{5.3-7}$$

式中: T 为试验电路的时间常数, $T=L/R$ 。

电路的功率因数 $\cos\varphi$ 值为

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi fT)^2}} \tag{5.3-8}$$

用式 (5.3-7) 计算出数据代入式 (5.3-8) 就可算出 $\cos\varphi$ 值。

2) 根据全电流波形描绘的直流分量曲线,按下式计算电路时间常数

$$I_d = I_{d0}e^{-\frac{t}{T}} \tag{5.3-9}$$

式中: I_d 为在 t 瞬间的直流分量值, t 可以任意选取; I_{d0} 为短路起始瞬间的直流分量值; t 为从起始瞬间算起的时间; T 为电路时间常数。

I_d 、 I_{d0} 和 t 根据直流分量曲线量取,功率因数角根据计算出的 T 值按下式求得

$$\varphi = \arctan(2\pi fT) \tag{5.3-10}$$

直流分量法的优点是测得的 $\cos\varphi$ 是试验全电路的功率因数,缺点是只适用于非周期分量电流值较大时,而 i_d 的

大小与 $\cos\varphi$ 及合闸相角都有关, $\cos\varphi$ 越小, i_d 越大,故此方法仅适用于 $\cos\varphi$ 较小时。从式 (5.3-8) 还可看出 $\cos\varphi$ 还与电源频率 f 值有关,因此在用此方法时必须测量实际电源频率。

(5) 冲击系数法。冲击系数法与直流分量法相同,都是利用电路闭合初始过程中电流呈不对称性这一特征,冲击系统法同样也适用于 $\cos\varphi$ 不大于 0.35 的场合。功率因数用电源电压过零瞬间合闸的第一个半波的电流峰值确定。

采用冲击系数法的测算过程如下:

1) 电路中应有一选相合闸开关,用此开关来选取电源电压过零瞬间闭合电路,拍摄相应的预期电流波形。

2) 从全电流波形(如图 5.3-7 所示)上量取第一半波峰值 I_1 和电流周期分量峰值 I_m 。

3) 根据 I_1 和 I_m 的比值计算出冲击系数

$$k = \frac{I_1}{I_m}$$

根据 k 值查表 5.3-10 可得到电路的功率因数值。此方法的优点是十分简便,其缺点是预期电流波必须是在合闸相角为 0° 时合闸才可用,而且对合闸相角的精度要求较高,应保持在 $\pm 5^\circ$ 范围内。另外当电路是在供电变压器的一次侧闭合时,此方法就不能采用。

表 5.3-10 功率因数与冲击系数关系

功率因数 $\cos\varphi$	功率因数角 $\varphi(^{\circ})$	抗阻比 $\tan\varphi=X/R$	冲击系数 $k=I_1/I_m$	峰值系数 $n=\sqrt{2}k$
0	90	∞	2.000	2.828
0.05	87.1	19.98	1.856	2.625
0.06	86.6	16.64	1.831	2.589
0.07	86.0	14.25	1.806	2.554
0.08	85.4	12.46	1.782	2.520
0.09	84.8	11.07	1.758	2.487
0.10	84.3	9.95	1.736	2.455
0.11	83.7	9.04	1.714	2.424
0.12	83.1	8.27	1.693	2.394
0.13	82.5	7.63	1.672	2.365
0.14	82.0	7.07	1.652	2.336
0.15	81.4	6.59	1.633	2.309
0.16	80.8	6.17	1.614	2.282
0.17	80.2	5.80	1.596	2.257
0.18	79.6	5.47	1.578	2.231
0.19	79.0	5.17	1.561	2.207
0.20	78.5	4.90	1.544	2.183
0.21	77.9	4.66	1.528	2.160
0.22	77.3	4.43	1.512	2.138
0.23	76.7	4.23	1.496	2.116
0.24	76.1	4.05	1.481	2.095
0.25	75.5	3.87	1.467	2.074
0.26	74.9	3.71	1.452	2.054
0.27	74.3	3.57	1.438	2.034
0.28	73.7	3.43	1.425	2.015
0.29	73.1	3.30	1.412	1.996
0.30	72.5	3.18	1.399	1.978
0.31	71.9	3.07	1.386	1.960
0.32	71.3	2.96	1.374	1.943
0.33	70.7	2.86	1.362	1.926
0.34	70.1	2.77	1.350	1.910
0.35	69.5	2.68	1.339	1.894
0.40	66.4	2.29	1.286	1.819
0.45	63.3	1.99	1.239	1.753
0.50	60	1.73	1.198	1.694
0.60	53.1	1.33	1.127	1.594
0.70	45.6	1.02	1.073	1.517
0.80	36.9	0.75	1.032	1.460
0.90	25.8	0.48	1.007	1.424
1.00	0	0	1.000	1.414

注 表中 $n=\sqrt{2}k$ 为第一个半波峰值电流与周期分量有效值之比。

1.6 时间常数测量

直流电路中的时间常数，是表征电器使用类别的基本参数之一，其值直接影响开关电器的分断性能。

直流电路的时间常数 T 在理论上等于试验回路总电感 L 与试验回路总电阻 R 的比值，即

$$T = L/R \quad (5.3-11)$$

根据式 (5.3-11) 可知，如果直接测量出试验电路中的 L 和 R 值，就可以求出时间常数 T 值，但直接测量 R 和 L 值很困难，因此在测量 T 值时，通常根据试验中的预期电流示波图，用作图法求出 T 值。

如果试验电路中的感性元件都是不随电流大小而改变的恒值电感，则电路接通后电流 i_d 按指数曲线上升，其电流表达式为

$$i_d = \frac{E_d}{R} (1 - e^{-t/T}) = I_d (1 - e^{-t/T}) \quad (5.3-12)$$

式中： E_d 为直流电源电压； R 为电路中总电阻； T 为电路的时间常数； I_d 为直流稳态电流。

由式 (5.3-12) 当 $t=T$ 时得

$$i_d = I_d (1 - e^{-1}) \approx 0.632 I_d \quad (5.3-13)$$

低压电器试验中时间常数的测量通常用以下方法：

根据式 (5.3-13)，在拍摄的预期电流波形（如图 5.3-8 所示）的纵坐标上取 $0.632 I_d$ 一点作横坐标的平行线与电流 i_d 曲线交于 E 点，以 E 点作垂直线交于时间轴上的 A 点，则 OA 的长度乘以示波图的时标即为 T 值。

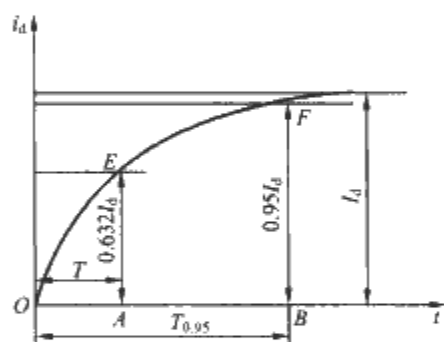


图 5.3-8 直流时间常数的图解测量

当试验负载中电抗器为带铁心而不是空心时，则有两种情况：一种是试验电流通过电抗器时，电抗器铁心不饱和，这时由于电抗器的电感与空心电抗器相同，也是一常数，故 T 的确定方法与上述方法相同；另一种是试验电流通过电抗器时铁心已饱和，则电流的上升不再呈现指数曲线，在这种情况下，时间常数失去意义，电路的 $L-R$ 特性改用 $T_{0.95}$ 表征， $T_{0.95}$ 为电流上升至稳态值 95% I_d 所需要的时间。采用这种电路元件作为负载的电器，也以 $T_{0.95}$ 作为通断试验的考核指标。与时间常数 T 相比较，如电感是线性（恒值），则 $T_{0.95} = 3T$ 。

1.7 电阻测量

电阻是表征某些电器（如电阻器、变阻器等）额定值的基本参数之一。电阻是反映物质导电特性的参数，按导电特性可以把物质分为超导体、导体、半导体及绝缘体。这些材料制成的元件、部件广泛应用在电工产品中。

在低压电器试验中，需要测量的电阻值范围很宽，为 $10^{-8} \sim 10^{17} \Omega$ 。下面介绍不同阻值范围电阻值测量的主要方法。

1.7.1 中值电阻测量

测量中值电阻（ $1 \sim 10^5 \Omega$ ）常用下述方法：

(1) 万用表法。万用表（欧姆挡）是用于直接测量中值电阻的直读仪表，测量范围为 $10^{-2} \sim 10^8 \Omega$ ，测量方便，但准确度不高。

(2) 数字欧姆表法。数字欧姆表和数字多用表中的欧姆功能挡是直接测量中值电阻准确度高、速度快的方法，测量范围为 $10^{-6} \sim 10^{11} \Omega$ 。使用时应注意与仪表的接线，有两端钮和四端钮之分，小于 $1k\Omega$ 的电阻一定要采用四端钮方法测量。

(3) 电压表—电流表法。电压表—电流表法测量电阻的基本原理是用电压表测量被测电阻两端的电压降，用电流表测量通过被测电阻的电流，根据欧姆定律求得被测电阻值。测量范围为 $10^{-8} \sim 10^6 \Omega$ 。这种方法准确度不高，其原因是受到电压表、电流表准确度的限制，而且还存在测量方法的误差。采用此方法测量电阻，一般只用于通电回路中或是要测量被测电阻在某一电流值时的电阻值，这对于电阻数值与电流有关的非线性电阻的测量是非常重要的。

(4) 电位差计补偿法。用电位差计补偿法测量电阻实际上是用电位差计作为比较仪器，根据电阻的四端定义，比较相串联的被测电阻与标准电阻的电压降，由标准电阻值求得被测电阻值。测量范围为 $10^{-3} \sim 10^6 \Omega$ 。这种方法的优点是严格按四端电阻定义测量电阻，端钮接线电阻、引线电阻不引入误差；可以方便地比较有源电路中两个阻值相近的电阻比值，这是一般测量方法很难达到的。使用电位差计补偿法测量电阻时，被测电阻值越接近标准电阻值，测量的准确度越高，越容易实现。

(5) 电桥法。采用电桥法测量电阻具有操作简单、读数方便、准确度高、对电源稳定性要求不高等优点。对 100Ω 以上的电阻测量一般采用单电桥法，测量范围为 $10 \sim 10^{10} \Omega$ ；对 100Ω 以下的电阻测量一般采用双电桥法，测量范围为 $10^{-6} \sim 10^3 \Omega$ 。对测量准确度要求在 0.02% 以下的一般采用电桥直接测量；对准确度要求在 0.02% 以上的可采用四跨线电桥测量，测量范围为 $10^3 \sim 10^6 \Omega$ 。

1.7.2 低值电阻测量

低值电阻一般是指 1Ω 以下的电阻，其数量级与引线电阻和接触电阻相当，因此消除引线电阻和接触电阻对测量结果的影响就成为测量低值电阻时需特别考虑的问题。为了测量的需要，总是把被测电阻做成具有四个端钮的测量样品，即一对电流端钮和一对电位端钮，而电阻的定义就是两个电流引线与两个电位引线交叉点之间的电阻。

测量低值电阻常用以下方法：微欧表法、电压表—电流表法、电位差计补偿法、双电桥法、四跨线电桥法及数字测量法等。在上述几种方法中，微欧表法使用方便，而电压表—电流表法只需使用一般仪表，其他的方法测量准确度可以提高，其中双电桥作为测量低值电阻的专用仪器在精密测量中得到最为广泛的应用。

(1) 微欧表法。指针式微欧表是测量低值电阻的直读仪表。测量范围为 $25 \sim 2500\mu\Omega$ ，准确度为 2%，适于测量接触电阻、金属镀层电阻及焊接点电阻等。

(2) 电压表—电流表法。在用电压表—电流表法测量低值电阻时，通常用 $10A$ 以上的电流，若被测电阻是 0.001Ω 时，其电压降也只有 $10mV$ ，因此测量时要使用安培表和毫伏表。

1.7.3 高值电阻测量

高值电阻一般是指 $10^6 \Omega$ 以上的电阻。测量高值电阻常用以下方法：绝缘电阻表法、检流计法、超高阻电桥法等。其中，绝缘电阻表法多用于测量绝缘材料的绝缘电阻，测量

范围为 $10^6 \sim 10^{10} \Omega$ 。

2 非电量参数的测量

2.1 时间测量

在低压电器试验中，常进行电器动作时间、释放时间、延时时间及其他试验时间的测量。测量范围为几毫秒至几小时，根据测量时间的长短可选用不同的计时仪器。

2.1.1 时间的一般测量

计时器的种类和式样繁多，其基本的共同点都是由标准频率源导出时间。钟表是人们最普遍使用的计时器，此外，常用的还有各类秒表、数字毫秒仪等。

(1) 钟表。钟表是由摆轮—游丝系统构成的指针式机械表，走时误差 $\pm 20\text{s}/\text{天}$ ；以石英谐振器作标准频率源的石英钟，走时误差 $\pm 0.2\text{s}/\text{天}$ ；现在最准确的钟是铯原子钟，已达到 30 万年不差 1s。

(2) 秒表。秒表分为机械式秒表和电秒表两类。秒表走时准确度为 $5\text{ms}/\text{s}$ 。

(3) 数字式毫秒仪。数字毫秒仪的基本工作原理是用计数法在被测时间间隔内累计标准时标的个数。它可用于直接测量电脉冲的时间间隔，机械触点的接通、断开时间，以及各种电信号的时间间隔等。毫秒仪也可作为数字频率计使用，用来测量电信号的频率和周期。

2.1.2 低压电器试验中时间的测量

在低压电器试验中，测量时间通常使用的仪器仪表有电钟、电秒表、电毫秒表和示波器等。

被测时间较长，例如几分钟至几小时数量级的，可用电钟测量。电钟有指针式和数字式两种，这两种电钟都有走时精确、使用方法简便的优点。

被测时间较短，例如几十毫秒至几分钟数量级的，可采用电秒表。电秒表也有指针式和数字式两种，这两种电秒表是专为测量动作时间而设计的，因此使用十分方便，且已普遍用于各种电器动作时间的测量。

被测时间更短，为毫秒数量级的，则应采用电毫秒表。电毫秒表也有多种结构形式，常用的多是数字式的，测时精度高，使用亦方便。

除上述专用测时仪器仪表外，测量时间在 0.1s 以下，特别是几个毫秒时，可采用示波器测量。

(1) 电秒表法。指针式电秒表是电器试验中最常使用的计时仪器，其原理电路如图 5.3-9 所示。指针式电秒表的核心是微型同步电动机 MS，它的转速与电网频率有关，如果电网频率稳定不变，则同步电动机 MS 通过电磁离合器 YC 带动的电秒表计时指针 S 的转速也稳定不变。图中 T 是变压器，它与整流器 U 配合提供灵敏继电器 KR 和离合器 YC 的操作电源。I、II、III 为接线端子。

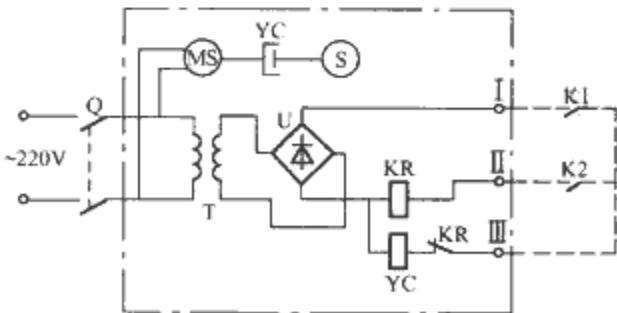


图 5.3-9 指针式电秒表原理电路图

Q—电源开关；MS—微型同步电动机；YC—电磁离合器；
S—电秒表指针；T—变压器；U—整流器；KR—灵敏继电器；
K1、K2—控制触点

当合上电源开关 Q，MS 即通电旋转至同步转速，这时由于离合器 YC 未啮合，故指针 S 不动。当外接电路的触点 K1 闭合后，使离合器 YC 线圈通电，离合器啮合，指针 S 旋转开始计时。如果外接电路的触点 K2 也闭合，这时灵敏继电器 KR 线圈也通电，其动断触点断开使离合器线圈断电，离合器立即脱开，指针 S 停止计时。从 S 开始旋转至 S 停止转动所转过的角度就代表从 K1 闭合至 K2 闭合所经历的一段时间，这是电秒表的一种操作方式。同样，当触点 K2 处于断开位置，触点 K1 闭合后又断开，则 S 转过的角度就是从 K1 闭合至断开所经历的一段时间，这是电秒表的另一种操作方式。

由于电秒表的转速与电网的频率有关，如果频率偏离额定值（50Hz）就会影响测时精度。

(2) 示波器法。当测量时间为几个毫秒时，则用电秒表测量的精度较差，这时一般可采用示波器法测量。用示波器拍摄动作信号和触头的接通、分断信号的示波图，通过示波图进行分析与计算来确定动作时间。目前多使用光线示波器，也可采用电子示波器。

2.2 焦耳积分测量

在电器进行短时耐受电流能力试验时，测量 I^2t 值（ I 为通电电流有效值， t 为通电时间）通常采用间接测量法，即分别测量 I 和 t ，通过计算求出焦耳积分 I^2t 值。在通电时间为 10s 的情况下，可以用电流表直读（或经电流互感器扩大量程）电流值，用数字毫秒计、电秒表或光线示波器测量通电时间；在通电时间为 1s 时，通常还是需要用光线示波器、瞬态记录仪、数字存储示波器等记录仪器测量 I^2t 值。

在通电期间，如通电电流不稳定，则可在示波图上画出包络线，并在电流的接通瞬间和每经 Δt 时间（ Δt 为 $1/10$ 通电时间）测一次电流有效值，共测得 11 个电流值 $I_0, I_1, I_2, \dots, I_{10}$ ，用辛普生公式计算焦耳积分，即

$$\int_0^t i^2 dt \approx \frac{1}{3} \Delta t [I_0^2 + I_{10}^2 + 4(I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2) + 2(I_2^2 + I_4^2 + I_6^2 + I_8^2)]$$

2.3 温度测量

温度的测量常用热电偶法。热电偶具有性能稳定、结构简单、尺寸小、热惯性小、对被测点温度影响小等优点；通过热电偶并将温度转换为电信号，便于实现多点切换测量。因此在生产和科研领域广泛使用热电偶来测量温度。

2.3.1 热电偶的测温原理

两种不同金属导体 A 和 B 两端连接起来构成闭合回路，这种结构称为热电偶。若使两连接端 1 和 2 具有不同的温度 t 和 t_0 时，如图 5.3-10 所示，这一回路中便会产生热电动势。

如果 $t > t_0$ ，将温度较高的连接端 1 称为热端，温度较低的连接端 2 称为冷端，回路中产生的热电动势可表示为

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0)$$

这里 $e_{AB}(t)$ 和 $e_{BA}(t_0)$ 是热端和冷端产生的电动势，是温度 t 和 t_0 的函数，下标 AB 表示导体间电动势方向由导体 A 指向导体 B，若 AB 顺序更换，则电动势符号也相应改变，故上式可改写为

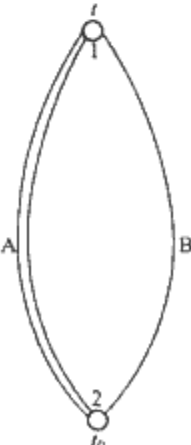


图 5.3-10 热电偶

1—热端；
2—冷端

$E_{AB}(t,t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) = f(t) - f(t_0)$

如果保持冷端的温度 t_0 不变, 则 $e_{AB}(t_0)$ 为一常数 C , 因而 $f(t_0) = C$, 所以

$E_{AB}(t,t_0) = f(t) - C = \varphi(t)$ (5.3-14)

因此, 根据式 (5.3-14) 可以把温度的测量变换为热电动势的测量。

2.3.2 热电偶的选择

热电偶的测温范围很广, 不同材料组成的热电偶适用的测温范围不同。常用的标准型热电偶的测温范围见表 5.3-11; 标准型热电偶的允差等级见表 5.3-12。

表 5.3-11 常用标准型热电偶的使用温度

热电偶分度号	热电极材料	熔点 (°C)	丝材直径 (mm)	推荐使用最高温度 (°C)	
				长期使用	短期使用
S	铂佬 10 铂	1847 1769	0.5	1300	1600
R	铂佬 13 铂	1865 1769	0.5	1300	1600
B	铂佬 30 铂佬 6	1925 1820	0.5	1600	1800
K	镍铬 10 镍硅 3	1429 1401	0.3	700	800
			0.5	800	900
			1.2	1000	1100
			3.2	1200	1300
E	镍铬 康铜	1429 1222	0.3	350	400
			0.8	450	500
			2.0	650	750
			3.2	750	850
J	铁 康铜	1492 1222	0.3	300	400
			0.8	400	500
			2.0	500	600
			3.2	600	750
T	铜 康铜	1084 1222	0.2	150	200
			0.5	200	250
			1.0	250	300
			1.6	350	400

表 5.3-12 常用标准型热电偶的允差等级

热电偶分度号	等级	使用温度范围 (°C)	允差偏差 (°C)
S	I	0~1100	±1
	II	0~600	±1.5
R	I	0~1100	±1
	II	0~600	±1.5
B	II	600~1700	±0.25% <i>t</i>
	III	600~1700	±4
K	I	-40~1100	±1.5 或 ±0.4% <i>t</i>
	II	-40~1300	±2.5 或 ±0.75% <i>t</i>
	III	-200~40	±2.5 或 ±1.5% <i>t</i>

续表

热电偶分度号	等级	使用温度范围 (°C)	允差偏差 (°C)
E	I	-40~800	±1.5 或 ±0.4% <i>t</i>
	II	-40~900	±2.5 或 ±0.75% <i>t</i>
	III	-200~40	±2.5 或 ±1.5% <i>t</i>
J	I	-40~750	±1.5 或 ±0.4% <i>t</i>
	II	-40~750	±2.5 或 ±0.75% <i>t</i>
T	I	-40~350	±0.5 或 ±0.4% <i>t</i>
	II	-40~350	±1 或 ±0.75% <i>t</i>
	III	-200~40	±1 或 ±1.5% <i>t</i>

2.3.3 低压电器试验中温度的测量

在低压电器温升试验中, 电器部件 (触头、接线端子、易近部件、弹簧及内部导体连接处等) 表面温度常用热电偶法测量。大部分电器产品的允许温升在 200°C 以内, 可采用铜—康铜热电偶, 少数高于 200°C 的电器产品可采用铁—康铜或镍铬—镍硅热电偶。

(1) 热电偶的测温线路。常用的热电偶测温线路有两种: 一种是冷端放在空气中, 直接把铜丝和康铜丝的两个端头接到电位差计两端, 如图 5.3-11 (a) 所示。这种方法比较简便, 但由于热电偶的热电特性曲线往往不是线性的, 所以测出热电动势后还必须经过补偿校正。另一种测温线路是在热电偶测量线路中再反接串联一个相同的热电偶, 如图 5.3-11 (b) 所示。并将串接的热电偶冷端置于保温瓶内的冰水混合物中, 冰水保持 0°C, 由电位差计测出的热电动势直接可得出被测点的温度, 与周围空气温度无关, 因而准确度较高, 但必须附带一只装有冰水混合物的容器, 并保持 0°C 不变。

一台电器产品往往要同时测量许多点的温度, 所以通常用一只开关转换箱接入测量电路, 如图 5.3-11 中 2 所示。低压电器温升试验中, 热电偶工作端的热电动势很小, 要求测量仪表要灵敏, 测量电路基本上无损耗。目前常采用电位差计、毫伏计及数字电压表等进行测量。直流电位差计在测量中不从信号源获取电流, 最小分度值可以达到很小, 因此适合于测量微小电压, 故在温度测量中是测量热电偶的热电动势的理想仪器。不论使用何种仪表, 经校正后误差应小于 ±1°C。

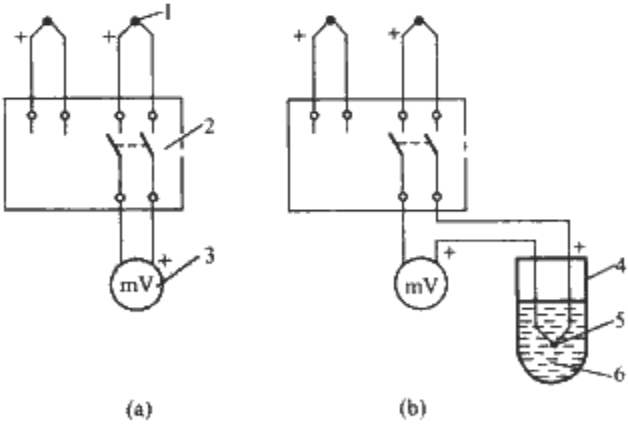


图 5.3-11 热电偶测温线路

(a) 冷端放在空气中; (b) 冷端放在冰水中

1—热端; 2—开关转换箱; 3—电位差计;

4—保温瓶; 5—冷端; 6—冰水

(2) 热电偶的测温方法。在低压电器温升试验中, 最常用使用的热电偶是分度号为 T 的铜—康铜热电偶。在冷端温度为 0°C 时, 它的热电动势与热端温度在常用范围内的对照关系见表 5.3-13。

表 5.3-13 热电偶的热电动势与热端温度对照表
分度号: T

参考端温度为 0℃

热端温度 (℃)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	热电动势 (mV)									
0	0.000	0.039	0.078	0.117	0.156	0.195	0.234	0.273	0.312	0.351
10	0.391	0.430	0.470	0.510	0.549	0.589	0.629	0.669	0.709	0.749
20	0.789	0.830	0.870	0.911	0.951	0.992	1.032	1.073	1.114	1.153
30	1.196	1.237	1.279	1.320	1.361	1.403	1.444	1.486	1.528	1.569
40	1.611	1.653	1.695	1.738	1.780	1.822	1.865	1.907	1.950	1.992
50	2.035	2.078	2.121	2.164	2.207	2.250	2.294	2.337	2.380	2.424
60	2.467	2.511	2.555	2.599	2.643	2.687	2.731	2.775	2.819	2.864
70	2.908	2.953	2.997	3.042	3.087	3.131	3.176	3.221	3.266	3.312
80	3.357	3.402	3.447	3.493	3.538	3.584	3.630	3.676	3.721	3.767
90	3.813	3.859	3.906	3.952	3.998	4.044	4.091	4.137	4.184	4.231
100	4.277	4.324	4.371	4.418	4.465	4.512	4.559	4.607	4.654	4.701
110	4.749	4.796	4.844	4.891	4.939	4.987	5.035	5.083	5.131	5.179
120	5.227	5.275	5.324	5.372	5.420	5.469	5.517	5.566	5.615	5.663
130	5.712	5.761	5.810	5.859	5.908	5.957	6.007	6.056	6.105	6.155
140	6.204	6.254	6.303	6.353	6.403	6.452	6.502	6.552	6.602	6.652
150	6.702	6.753	6.803	6.853	6.903	6.954	7.004	7.055	7.106	7.156
160	7.207	7.258	7.309	7.360	7.411	7.462	7.513	7.564	7.615	7.666
170	7.718	7.769	7.821	7.872	7.924	7.975	8.027	8.079	8.131	8.183
180	8.235	8.287	8.339	8.391	8.443	8.495	8.548	8.600	8.652	8.705
190	8.757	8.810	8.863	8.915	8.968	9.021	9.074	9.127	9.180	9.233

由于在温升测量时，通常热电偶冷端温度不是 0℃，要得到温升值可按以下步骤进行：

- 1) 用温度计测量热电偶的冷端温度 θ_1 ，从表 5.3-13 中查出与 θ_1 对应的热电动势 e_1 值。
- 2) 用毫伏表测量热电偶的热电动势 e_{21} 值。
- 3) 计算 $e_2 = e_1 + e_{21}$ 。
- 4) 从表 5.3-13 中找出与 e_2 最接近的热电动势值并查出与之对应的温度 θ_2 ， θ_2 的小数位可按插值法估算。
- 5) 计算温升 $\tau = \theta_2 - \theta_0$ ， θ_0 为环境温度。

值得注意的是，由于热电动势与温度的非线性关系，切不可用测得的热电偶的热电动势 e_{21} 值从表 5.3-13 中直接查对应温度 θ' ，作为测得的温升值。例如在实验室环境温度为 30℃ 时，热电动势 $e_{21} = 3\text{mV}$ ，如直接查表可得 $\theta' = 72.1^\circ\text{C}$ 。当按前述步骤计算时，因 $\theta_1 = \theta_0 = 30^\circ\text{C}$ ， $e_1 = 1.196\text{mV}$ ， $e_2 = e_1 + e_{21} = 4.196\text{mV}$ ， $\theta_2 = 98.3^\circ\text{C}$ ，温升 $\tau = \theta_2 - \theta_0 = 68.3\text{K}$ 。

如误取 $\tau' = \theta' = 72.1\text{K}$ 为温升值，将比应得值 τ 提高 3.8K，最终可能造成对试验结果的误判断。

现在与热电偶配合使用的数字温度计已经在一些实验室投入运行，这类仪表不需经查表计算而直接显示温度值或温升值，是一种准确、方便、实用的仪表。但是，如仪表本身未加冷端补偿，显示温度值是根据热电动势值按 T 分度表转换得到的，则使用这种仪表要求将热电偶冷端置于 0℃ 下，仪表读出的温度值才有效。否则以仪表直读温度值当作温升值将同错误地查分度表有同样结果。

2.4 磁通测量

电磁系统既可以单独成为一类电器，如电磁铁、电磁离

合器等；也可以作为电器的部件，如用作电磁接触器、电磁式继电器、电磁式脱扣器等。电磁系统的计算实质上就是其磁场的计算，磁路是磁场在一定条件下的一种简化形式。磁路的分布性为磁场的性质所决定，而磁路的非线性则由磁导体材料的性质所决定，这两个特点使得电磁系统计算格外复杂和困难，且不易得到准确计算结果，因此常通过磁路参数的实际测量，来分析电磁系统的性能、设计的合理性以及计算的准确性。

测量磁场和磁路参数的方法很多，目前在电器中应用较多的是电磁感应法。

2.4.1 电磁感应法的原理

根据法拉第电磁感应定律，将一个探测线圈放在被测磁场中或套在磁导体上，当线圈中的磁通 Φ 变化时，将在线圈中产生感应电动势

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \tag{5.3-15}$$

式中：N 为线圈匝数； Φ 为磁通。

将式 (5.3-15) 在磁通变化时间 $t_0 \sim t_1$ 内积分，得线圈中磁通变化值

$$\Delta\Phi = \frac{1}{N} \int_{t_0}^{t_1} e dt \tag{5.3-16}$$

可见，只要测出探测线圈的感应电动势对时间的积分值 $\int_{t_0}^{t_1} e dt$ ，便可求得在时间 $t_0 \sim t_1$ 内探测线圈中磁通的变化值 $\Delta\Phi$ 。

在交变磁场中，若磁通按正弦规律变化， $\Phi = \Phi_m \sin\omega t$ 。由式 (5.3-15) 并经整理可得探测线圈感应电动势的有效值

$$E = 4.44 f N \Phi_m \tag{5.3-17}$$

式中：f 为电源频率；N 为线圈匝数； Φ_m 为磁通的幅值。

从而可求得磁通的幅值为

$$\Phi_m = \frac{E}{4.44fN} \quad (5.3-18)$$

当已知线圈平均截面积 S 时, 由电磁感应法同样可以求得在时间 $t_0 \sim t_1$ 内探测线圈中磁感应强度的变化值 ΔB 和磁感应强度的幅值 B_m 。

2.4.2 磁通的测量

(1) 恒定磁通测量。恒定磁通的测量以式 (5.3-16) 为根据, 是将探测线圈的单个脉冲的感应电动势进行积分的测量方法。根据所采用的积分方式的不同, 恒定磁通的测量常使用经典式磁通计、冲击检流计、电子磁通计及数字磁通计等。

1) 经典式磁通计。经典磁通计是悬丝的反作用力矩很小、在过阻尼状态下工作的磁电式检流计, 它和冲击检流计一样作为电压积分器用。当和磁通计连接的探测线圈内的被测磁通变化时, 活动线圈内感生电流并带动指针偏转, 偏转角的大小与磁通变化值成正比

$$\Delta\Phi = C_\Phi \Delta\alpha$$

式中: $\Delta\Phi$ 为被测磁通的变化值; C_Φ 为磁通计的磁通常数; $\Delta\alpha$ 为磁通计的偏转角。

由于磁通计没有机械反作用力矩, 因此磁通计的指针可停留在刻度盘上任意位置, 初始位置也可以不在零位, $\Delta\alpha$ 是指针最终位置与初始位置之差。当需要调零时, 可以使用表内的电磁调整器。

由于自由运动周期很长, 经典磁通计不存在磁通非瞬时变化引起的误差, 可用于电感大的电路和材料磁滞效应明显的情况。经典磁通计的缺点是灵敏度低, 通常比冲击检流计低两个数量级。

2) 电子磁通计。电子磁通计采用电子积分器直接对探测线圈内磁通变化产生的感应电动势进行积分, 求得磁通变化值。电子积分器由运算放大器和电阻、电容组成。当放大器的增益很大且参数满足一定条件时, 放大器的输出电压与磁通变化值成正比

$$\Delta\Phi = RCU_2$$

式中: $\Delta\Phi$ 为被测磁通的变化值; R 为电阻; C 为电容; U_2 为放大器的输出电压。

电子磁通计的灵敏度高, 测量范围较宽, 能连续测量, 探测线圈的电阻可大些。它适用于恒定磁场、交变磁场和脉冲磁场的测定, 并可测定磁场的瞬时变化, 还可借助数字电压表实现模拟记录、数字显示以及自动化测量。

3) 数字磁通计。数字磁通计由电压—频率 (U/f) 变换器、脉冲计数器和显示电路组成。电压—频率变换器由积分器、脉冲发生器及开关电路组成, 实际上是一种数字积分器, 它把探测线圈所感应的电动势变换为一系列的脉冲, 脉冲的数目正比于感应电动势的积分值 $\int e dt$, 然后用电子计数器将其累加得到脉冲数为

$$n = \int f dt = K \int e dt = K \Delta\Phi$$

式中: $K = f/e$ 为电压—频率变换系数; $\Delta\Phi$ 为被测磁通的变化值。

数字磁通计测量准确度高, 测量速度快, 但不能用于连续测量。

(2) 交变磁通测量。交变磁通的测量比恒定磁通的测量较为简单。其原理是以式 (5.3-17) 为根据, 即将探测线圈直接与高内阻的电压表连接, 当磁场存在时, 电压表的读数即为探测线圈感应电动势的有效值 E , 根据式 (5.3-18) 即

可求得磁通的最大值 Φ_m 。

2.5 力和力矩测量

2.5.1 力的测量

在低压电器试验中力的测量一般包括触头间的接触压力、电磁系统的吸力和剩磁力、操动器的操作力、接线端子导体插入力和拉出力及弹簧力等。通常采用的测力方法有弹簧秤法、悬重拉力法、测弹簧压缩法及传感器法等。前三种方法是通用的基本方法, 但操作不便、精度不高、只能用于静态力的测量, 而动态力必须用以力的传感器为核心的动态测试装置进行测量。

(1) 弹簧秤法。弹簧秤 (管形测力计) 法是一种简便、直观的测力方法。将弹簧秤钩于被测部件上, 直接拉伸到规定位置或状态, 从刻度盘上可方便地读取被测力的数值。

(2) 悬重拉力法。悬重拉力法是将被测力通过拉线和滑轮转换到垂直向上方向, 并采用砝码与其相平衡, 根据平衡砝码的重量即可确定被测力的数值。

(3) 测弹簧压缩法。对弹簧产生的力, 若不利于直接测量, 可通过测弹簧压缩或拉伸法测量。可将弹簧从电器上拆下, 用弹簧试验机测量相应压缩或拉伸长度时的力, 即可得被测力的大小。

(4) 传感器法。传感器法的测试系统主要由传感器、电子测量线路、输出和记录环节三部分组成。电器中的力直接作用在传感器上, 将被测力的变化直接或间接地转换为电信号, 经电子测量线路将电信号进行变换、放大后, 由输出环节显示或由记录仪器记录。

通常使用的测力传感器主要有压电传感器和电阻应变传感器。

1) 压电传感器。压电传感器的原理是利用压电材料的压电效应。当有一定方向的力作用在压电材料上时, 压电材料表面会产生电荷, 电荷量与外力成正比, 因此从它可测的基本参数来讲是一种力传感器。压电传感器也可以测量能通过检测元件或其他方法转换成为力的参数, 如位移、加速度等。

压电传感器的特点是尺寸小、质量轻、结构简单、工作可靠、测量频率范围宽等。由于外力作用而在压电材料上产生的电荷只有在无泄漏的情况下才能保存, 即需要测量回路具有无限大的输入阻抗, 这实际上是不可能的, 因此压电传感器不能用于静态测量。压电材料在交变力的作用下, 电荷可以不断补充, 可供测量回路一定的电流, 故适用于动态测量。

2) 电阻应变传感器。电阻应变传感器是把电阻应变片作为检测元件, 将被测力所产生的金属弹性变形转换为电阻变化的传感器。

电阻应变片是用直径约为 0.025mm 的具有高电阻率的电阻丝制成, 为了获得高的电阻值, 电阻丝排列成栅网状 (称为敏感栅), 并粘贴在绝缘的基片上, 电阻丝的两端焊接有引出导线, 线栅上面贴有覆盖层。应用电阻应变片测试时, 将应变片牢固地粘贴在电器中受力后产生变形的相应构件或弹性敏感元件上。当受力变形时, 应变片的敏感栅也随之变形, 其电阻值随之发生相应变化。测量线路进一步将电阻信号转换成电流或电压信号, 以使用电测仪表进行测量, 电桥电路是实现这种转换的最常用的一种方法。

电阻应变传感器可用于力、扭矩、压力及加速度等参数的测量。

2.5.2 力矩的测量

在低压电器试验中力矩的测量一般包括接线端子拧紧力矩、安装螺钉或螺母拧紧力矩、手动电器操作力矩及电磁离合器力矩等。静力矩通常采用指针式或数显式扭矩扳手、扭矩测试仪测量；动力矩多用扭矩传感器配合仪表进行测量。另外，还可以用已知长度的力臂配合力传感器和仪表进行间接测量。

按扭矩测试仪的工作，电器试验中多使用电阻应变式和相位差式两种。

(1) 电阻应变式扭矩仪。利用粘贴在传动轴上一定位置的应变片感受由于扭矩的作用而产生的剪应变，并转换成电阻的变化，通过测量电桥转换成电流或电压信号，对扭矩进行间接测量。

(2) 相位差式扭矩仪。在扭矩的作用下，受力轴沿轴向一定距离的两个断面之间会产生角位移，此角位移与扭矩成正比。用机电信号变换器分别装于两断面处，可将断面的角位移转换成电信号的相位差，此相位差正比于角位移，也正比于扭矩的数值。因而，用测量相位差的方法可间接测出扭矩值。

2.6 长度和位移测量

在低压电器试验中长度、位移的测量一般包括外形尺寸与安装尺寸、电气间隙与爬电距离、触头行程与差程、电磁系统的衔铁行程、弹簧尺寸及零部件尺寸等。通常采用的测量器具有游标卡尺(0.02mm)、塞规、千分尺、直尺、卷尺及符合要求的专用量器具等。还可用以传感器为核心的测试装置进行测量。

2.6.1 游标计量器具

该类量器是利用游标原理进行测微和读数的量器。常用的游标量器如下：

(1) 游标卡尺。主要用于测量内、外直径和长度。典型结构型式有三用式(内、外及深度测量)、带百分表式、电子数显式等三种。

(2) 高度游标卡尺。主要用于测量工件的高度和进行精密划线。

(3) 深度游标卡尺。主要用于测量孔和沟槽的深度。

2.6.2 螺旋副计量器具

该类量器是应用螺旋副传动原理，将回转运动变为直线运动的一种测微量器。常用的螺旋副量器有测量外尺寸的千分尺、测量内尺寸的千分尺、深度千分尺等三种。

2.6.3 传感器法

通常使用的位移传感器主要有电感传感器和感应同步器。

(1) 电感传感器。电感传感器是利用线圈电感的变化实现位移测量的一种传感器。按其使电感变化的方式可分为将被测位移转换为自感量 L 的变化和将被测位移转换为互感量 M 的变化两大类。前一类简称为自感传感器；后一类简称为互感传感器，由于它做成差动式，故又称为差动变压器。电感传感器的主要特点是测量精度较高、灵敏度高、结构简单可靠、输出功率较大。电感传感器除用于测量机械位移外，也广泛用于压力、厚度、振动、流量、浓度等参数的静、动态测量。

(2) 感应同步器。感应同步器又称精密位置传感器，它是将位移量转换为电信号，通过对电信号的检测实现测量位移的目的。感应同步器可分为两种：测量线位移的称为直线式感应同步器；测量角位移的称为圆盘式感应同步器。感应

同步器由于具有测量精度高、抗干扰能力强、可靠性好、对环境条件要求不高及使用维护方便等优点，目前在军事、宇航、航海及机床等方面的自动化测量和自动控制系统中得到广泛的应用。

2.7 触头参数测量

触头是开关电器的执行部件，它担负着接通和分断电路的任务。触头对开关电器的工作性能、总体结构和尺寸有决定性的影响。各类开关电器的关键性能，如接通和分断能力、电气寿命、接触可靠性等，都取决于触头的工作性能和质量。触头也是有触点电器最薄弱和容易出故障的部件。

触头的主要参数包括触头开距、超程、初压力和终压力。这些参数直接影响电器使用的可靠性，如果这些参数不符合要求，轻则会使电器寿命降低、触头温度过高，重则会引起触头熔焊、烧毁等，因此要对触头参数进行严格检查。

2.7.1 触头开距和超程的测量

触头开距是指触头在处于完全断开位置时，动、静触头之间的最短距离。开距的大小应保证触头能可靠分断电弧，并能保证动、静触头之间的绝缘间隙。

触头超程是指触头处于完全闭合状态后，将静触头移去时动触头在接触处发生的位移。超程的大小应保证在寿命期内触头磨损后仍能可靠接触。

低压电器的触头主要有双断点桥式触头和单断点指式触头两种典型结构，桥式触头和指式触头的开距和超程如图5.3-12和图5.3-13所示。

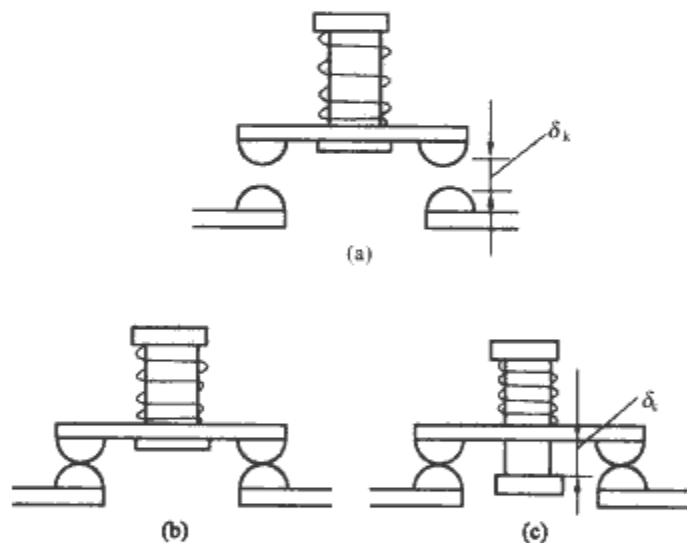


图 5.3-12 桥式触头示意图

(a) 完全断开位置；(b) 刚闭合位置；(c) 完全闭合位置
 δ_k —触头开距； δ_c —触头超程

触头开距和超程的测量，可用游标卡尺、内卡钳或标准板块等量器测量，也可制作专用的触头开距超程测试仪器进行测量。目前已研制成功的测试仪一般都为屏幕数字显示，具有打印记录等多功能式样，根据产品规格大小的不同，制成不同尺寸的专用夹具来满足各类产品不同参数的检查要求，保证了参数检查的可靠性、正确性，大大降低了出厂检验人员的劳动强度。

桥式触头超程的测量，可在触头处于完全闭合位置时，将静触头移开而测量动触头在接触处发生的位移，若将装配好的电器静触头移开不方便时，也可测量动触头与其支架之间的空隙。对指式触头需进行换算，若在图5.3-13中 r_z 为测得的触头与其支架间的空隙， l_z 为测量点到支点间的距离， l_k 为触头接触点到支点间的距离，则超程 δ_c 为

$$\delta_c = r_z \frac{l_k}{l_z}$$

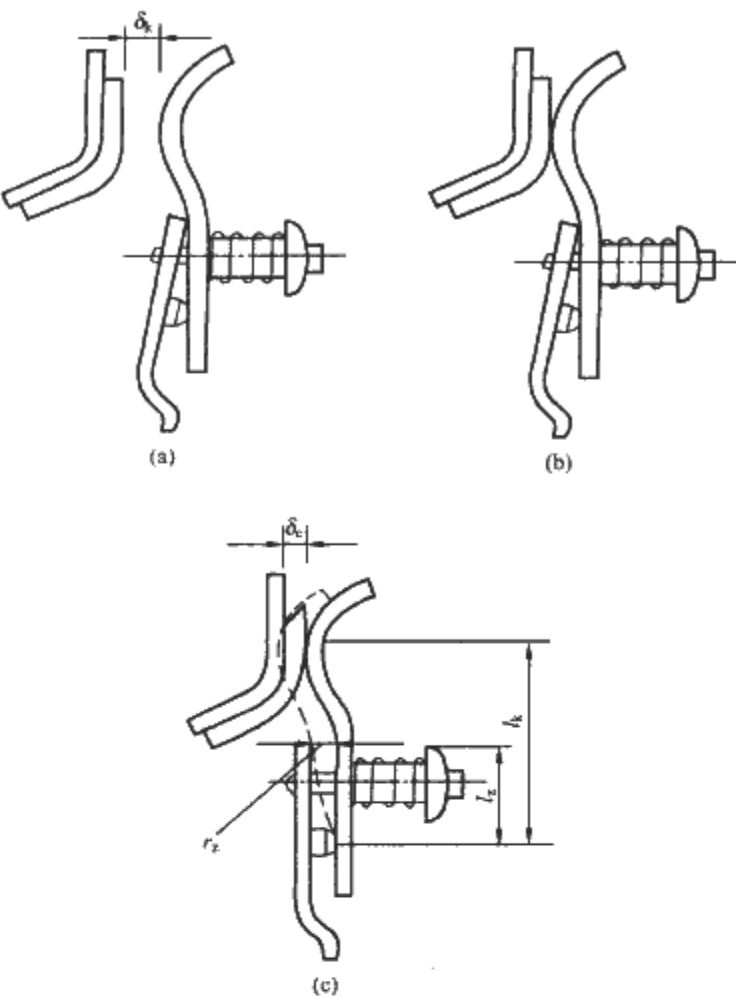


图 5.3-13 指式触头示意图

(a) 完全断开位置；(b) 刚闭合位置；(c) 完全闭合位置
 δ_k —触头开距； δ_c —触头超程

2.7.2 触头初压力和终压力的测量

触头初压力是指动、静触头刚接触时，每个触头（对双断点是指每个触头）上的压力。触头具有一定的初压力可使触头的弹跳时间减少，减小触头的磨损并提高抗熔焊能力，大大提高产品使用寿命。

触头终压力是指触头完全闭合时，每个触头上的压力。触头具有一定的终压力可限制触头间的接触电阻，降低触头接触压降，避免触头过分发热，并保证触头在通过最大短路电流时不致因电动力的作用而斥开。

触头初压力和终压力的测量，可采用弹簧秤法、悬重拉力法、测弹簧压缩法进行。也可制作专用的触头压力测试仪器进行测量。

桥式触头和指式触头终压力的悬重拉力测量方法如图 5.3-14 和图 5.3-15 所示，触头处于完全闭合位置时通过专用悬重产生拉力。对于桥式触头，当图 5.3-14 中的砝码重量小于触头终压力时，触头所串联的指示灯一直亮着，逐渐增加砝码重量，当指示灯刚刚熄灭，即触头刚刚分开，如装置的拉力与触头压力的方向和作用点成一直线时，则砝码重量的一半即为触头的终压力。有时也可采用纸条作指示，用厚度不超过 0.05mm、宽度与触头相当的光滑纸条夹在动、静触头之间，当能轻轻抽动时表示触头刚刚分开。对于指式触头，其触头的终压力为图 5.3-15 中指示灯刚刚熄灭时的

砝码重量。上述产生拉力的方法也可采用弹簧秤法，但弹簧秤必须事先经过标准砝码校正方能使用；也可拆下触头弹簧放在弹簧试验机上将弹簧压缩到终压力时的压缩长度，此时所测得的压力即为触头终压力。

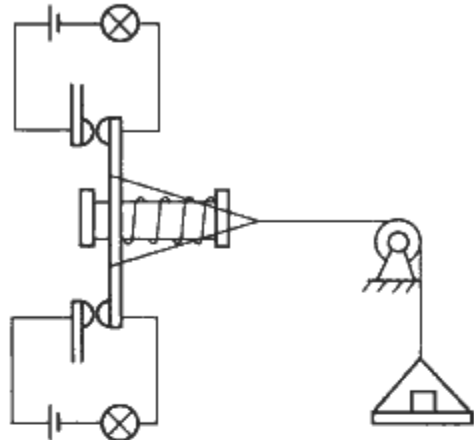


图 5.3-14 桥式触头终压力测量示意图

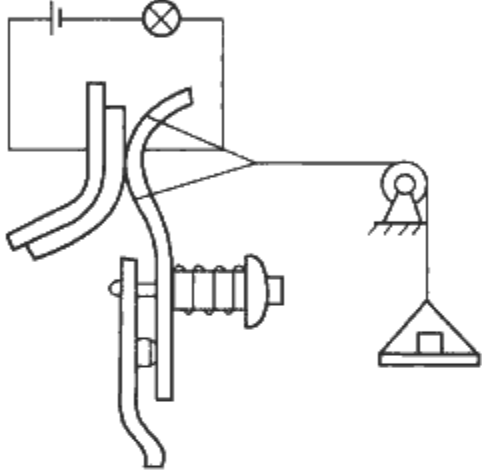


图 5.3-15 指式触头终压力测量示意图

测量触头初压力可以采用与测量终压力相同的办法，但应在触头处于刚接触位置时进行测量。这种位置一般难以固定，因为触头初压力是由触头弹簧在装配时被预压缩而形成的，所以也可以在触头处于断开位置时测量。指式触头初压力测量方法如图 5.3-16 所示，在动触头及其支架间夹上纸条，逐渐增加砝码重量，当能轻轻抽动时，砝码重量即为触头初压力。桥式触头初压力可用同样的方法测量，也可将触头弹簧拆下直接测量，根据预压缩长度在弹簧试验机上测得的压力的一半即为触头初压力。

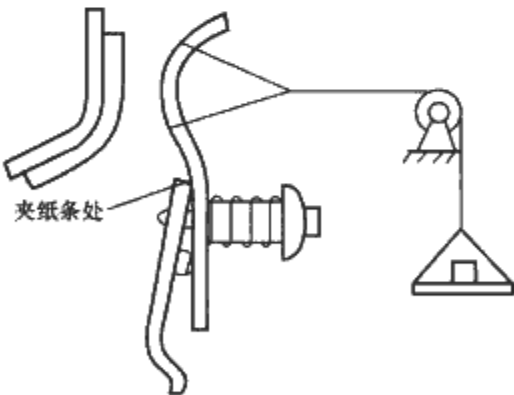


图 5.3-16 指式触头初压力测量示意图

第4章 低压电器试验的计算机测试技术

1 低压电器的测试技术

低压电器试验是保证产品质量与可靠性的重要手段,也是改进产品设计的重要途径。试验的规模与能力、试验的测试技术水平可以衡量一个低压电器试验机构水平的高低。在试验机构的规模与能力方面,主要决定于能进行的试验项目是否齐全和进行分断能力试验的试验电流大小。在试验机构的测试技术水平方面,主要决定于低压电器试验的自动化水平及电气参数的采集与处理技术。

低压电器种类繁多,主要包括断路器、接触器、漏电保护器、过载继电器等电器产品。其试验内容和方法各不相同。低压电器试验由继电—接触控制方式向 PLC 控制方式发展,并进一步向计算机控制方式发展。此外,手动电器的自动操作也是衡量试验机构自动化水平的重要标志。

在控制方式上,接触器等电器产品的通、断是由其电磁系统控制的,在进行试验时有多种控制方式,比较容易实现试验自动控制。对于断路器等电器产品,大部分操动机构是手动操作的,实现这类电器的自动操作是提高试验水平的关键。对于带漏电保护功能的电器来说,除了手柄操作外,还应具备复位按钮及试验按钮等手动部分的自动操作。

断路器的手柄合/分闸驱动电路主要由光隔离器和电动机组成。电动机采用单相交流电动机,每个试品手柄驱动电路均设有两路,分别控制电动机的正转与反转。而电动机的旋转运动通过机械操动机构中的连杆机构转变为直线运动,带动机械手上/下运动,拨动被测试品的操作手柄,完成合/分闸操作。合/分闸到位监测电路也包括两路信号传输,主要由霍尔开关及光隔离器组成。当机械手将被测试品的手柄合闸到位时,机械手附带的霍尔开关闭合,监测电路被接通,合闸到位指示灯亮,同时合闸到位信号经光隔离器传输给计算机;此时,微机可控制电动机停转,使被测试品处于合闸状态。同理,当机械手将被测试品的手柄分闸到位时,计算机可根据分闸到位监测电路接收到手柄分闸到位信号,控制电动机停转,使被测试品处于分闸状态。由此可见,被测试品的合/分闸操作以及处于合/分闸状态的时间均可由微机控制,因此,试验设备可实现操作频率可调。漏电断路器的复位按钮及试验按钮的自动操作一般可由微机通过驱动电路来控制螺管电磁铁产生直线运动来完成。

同时,计算机技术的应用,不仅使电器试验时的自动控制水平得到提高,还使试验中的监测水平得到提高。例如,断路器的瞬动保护试验中,试验电流的非周期分量成为影响试验准确性的关键。通过采用计算机技术,在理论上应用先进的快速傅里叶积分变换方法计算电网的频率、电路功率因数以及合闸相角,并采用选相合闸技术,同时实现额定电流 I_N 、 $8I_N$ 及 $12I_N$ 的快速、实时的准确调节,解决了电器行业中目前普遍存在的调节精度不高、调节电流受室温变化及回路电阻变化而波动的技术难题,也从根本上消除了塑壳断路器瞬动保护试验中的非周期电流分量对瞬动特性调试的影响。

再如,在接触器试验中,电寿命和机械寿命试验是接触

器试验的重要内容。接触器的使用类别比较多,每个类别下的试验条件和方法不同。通过采用计算机技术后,不仅使各类别下试验的控制线路通用,还可以实现接触器故障的判断。无论是继电—接触控制方式,还是 PLC 控制方式,接触器触头熔焊、虚接等判断都是通过接触器的辅助触点来间接实现的。在很多情况下,辅助触点并不能完全反映接触器主触头的情况,特别是在接触器主触头烧损严重时,接触压降显著增大时也无法进行判别。采用计算机控制技术,通过对试验电流、触头上电压的监测,可以实现对接触器带载试验进行全面监测,及时检测到接触器触头熔焊、虚接等故障。

2 塑壳断路器特性测试技术

2.1 过载特性测试技术

2.1.1 过载保护试验方法

根据塑壳断路器过载保护要求的特点,将塑壳断路器的过载保护试验分为三类:

(1) 冷态试验,即从冷态下开始进行塑壳断路器的过载特性试验。

(2) 热态试验,即从热态下开始进行塑壳断路器的过载特性试验。

(3) 可返回试验,即对塑壳断路器的可返回特性进行试验。

在试验中,需要进行不同过载倍数下的试验。根据以上分类方法,可以方便地进行过载保护试验。根据试验进行阶段的不同,可将试验分为试验过程和试验循环。一个试验循环包括一个或多个试验过程,一个试验过程中包括了两个试验电流,这两个试验电流可以由不同的试验电源产生,其中一个试验电流可以为零。在试验时,根据试验要求确定试验循环中的过程数、每个试验过程的试验电流及试验循环数。

对于没有自动合/分闸机构的断路器,可以将试验方式设置为手动试验。在手动试验方式下,每个过程试验结束后,计算机就会自动等待下一过程的试验,当试验人员对试品进行手动合/分后,继续进行下一过程的试验。

塑壳断路器过载保护试验装置应具备如下主要性能:

1) 用户可以通过试验设备的软件进行参数的设定,并可在试验中进行修改。

2) 可同时进行三台试品的试验。

3) 试验设备能自动对试验进行监测,并自动调节试验电流。

4) 自动完成整个试验,包括 $1.05I_N$ 试验、 $1.3I_N$ 试验、 $3.0I_N$ 的可返回特性试验等。

5) 自动记录试验结果,并能打印试验数据。

2.1.2 试验装置的硬件设计

2.1.2.1 计算机控制电路

塑壳断路器过载保护试验装置是在计算机控制下进行试验的,其计算机控制原理框图如图 5.4-1 所示。

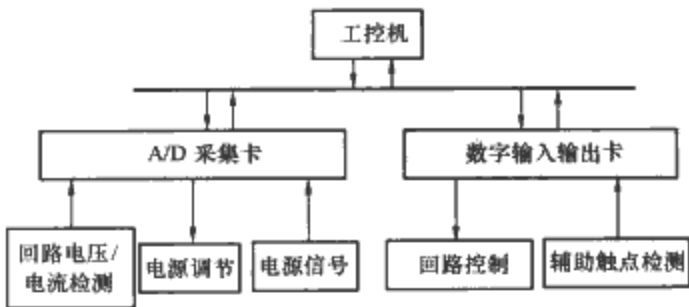


图 5.4-1 塑壳断路器过载保护试验计算机控制原理框图

图 5.4-2 是塑壳断路器过载保护试验装置的电路图。

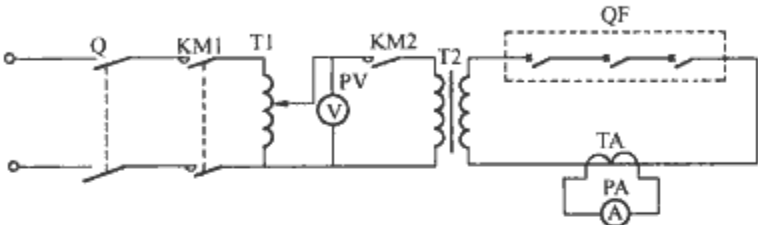


图 5.4-2 塑壳断路器过载保护试验装置电路图

Q—刀开关；KM1—接触器；T1—调压器；KM2—接触器；T2—大电流变压器；TA—电流互感器；PV—电压表；PA—电流表；QF—被试品

在试验装置中有两套电源，输出电流分别为 0~250A 和 0~750A，用于过载保护特性试验。在试验中，进行 $1.3I_N$ 试验时需要在热态下进行，即先做 $1.05I_N$ 的试验，试品不动作，紧接着通 $1.3I_N$ 试验电流进行试验。采用双电源后，可以缩短不同试验电流间的转换时间和调节时间，提高试验结果的准确度，同时，还可以进行 $3.0I_N$ 的可返回特性试验。如果采用单电源，是无法进行塑壳断路器的可返回特性试验的。

塑壳断路器动作后，试验电流回路也断开，因此，一般情况下一套试验电源只能进行一台试品的试验。过载特性的试验需要进行 2~4h，多台试品试验时，需要花费很长时间。为加快试验速度，可以将多台试品串联连接后，同时进行试验。当其中一台或多台试品动作后，电路自动转接平衡回路继续进行其他试品的试验。平衡回路阻抗和试品的内阻相近，并通过计算机进行自动稳流，因此试验电流变化很小，变化的时间也很短。

2.1.2.2 电流调节电路

由于过载保护试验时的电流变化范围宽，为提高控制和检测精度，应根据试验电流的大小选择合适的电流互感器。例如，对于额定电流从 10~225A 的塑壳断路器，可以将试验电流划分为四个范围，分别为 0~25A，0~75A，0~250A，0~750A。调节试验电流的电路框图如图 5.4-3 所示。

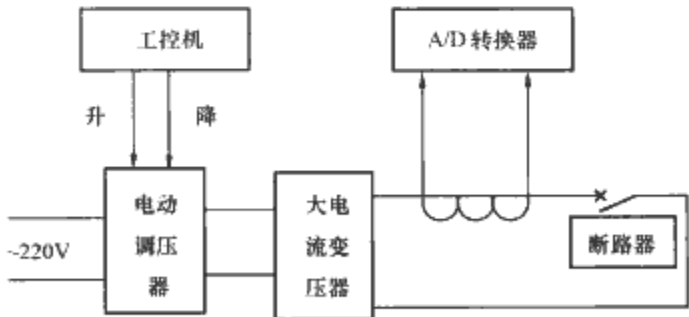


图 5.4-3 塑壳断路器过载保护试验电流调节电路框图

试验电流的调节是在计算机的控制下进行的，操作人员在计算机上进行电流参数的设定，计算机自动按照设定电流进行调节和稳定。电源电压波动或回路阻抗变化，引起试验电流变化时，计算机很快将电流调节到设定值，电流稳定精度高，响应速度快，可确保试验结果的准确性。通过试验回

路选择，可以进行单台试品的试验，也可以多台试品同时进行试验。

2.1.2.3 触头状态检测电路

触头状态检测电路的主要功能是判断塑壳断路器辅助触头的状态和主触头状态，即用于判断塑壳断路器在试验电流下的动作情况。该电路通过光电隔离后，将信号送至工控机。

2.1.3 试验装置的软件设计

2.1.3.1 Windows 下试验程序设计中几个需要注意的问题

在 Windows 下进行试验程序设计时，应注意以下几个问题：

(1) 实时性要求。硬件和软件是程序应用开发系统中的两个重要方面，硬件是基础，软件是关键。硬件电路的构成为实现装置的功能提供了必要的手段和可能，而所有功能的实现和可靠运行，主要在于软件的设计。塑壳断路器过载保护特性试验装置软件是在 Windows 2000 下采用 VC++6.0 开发的。VC 语言作为高级语言，提供了和硬件连接的接口命令，因此可以实现硬件的直接控制，又可以方便地编制比较复杂的人机界面程序。

塑壳断路器过载保护特性试验软件与 Windows 下的一般应用程序不同，实时性要求比较高。在既要求时间精度又要保证试验电流精度的情况下，必须考虑软件定时的精确性。为保证实时控制，在软件中采用硬件延时和控件延时两种方法。在要求延时时间短和延时精度较高的情况下，采用硬件直接延时；而在延时时间长和延时精度不高的情况下，采用时间控件延时。

(2) 单实例程序运行。在 Windows 操作系统下，允许应用程序同时多次运行，而在塑壳断路器过载可靠性试验中，使用了中断方式采集数据，占用了计算机系统硬件资源和外部硬件资源。如果在软件运行状态下，重复运行应用程序则会引起硬件资源冲突，使程序无法正常运行。为了避免此种错误操作，编程时禁止了程序的多实例同时运行。

(3) 模块化设计。为方便试验人员操作，在编制塑壳断路器过载保护特性试验软件时进行了各种功能的设计，有些功能是相似的，因此采用模块化方式进行控制软件的设计，不仅便于重复使用和软件调试，而且增强了试验运行的可靠性。软件编程时，实现了对试验人员操作的提示，具有良好的人机对话界面，可方便试验人员对试验装置的使用。

2.1.3.2 试验程序设计

塑壳断路器过载保护试验程序主要包括试验运行、数据显示、数据存取、参数设置四个主要模块。

试验运行是程序的关键部分，负责控制整个试验的进行以及试验数据的存储。主要包括单次试验运行模块、循环试验运行模块和调/稳流控制模块。单次试验控制子程序流程如图 5.4-4 所示，循环试验控制子程序流程如图 5.4-5 所示，循环试验运行界面如图 5.4-6 所示。

在过载保护特性试验中，电流从 0 调节到试验电流时，导体发热对过载特性要产生影响，调节时间越长，影响越大。为了快速调节电流，采用的电流调节方法是：电流从 0 上升到一定百分比的试验电流，如试验电流的 20% 或 50%，断开试验回路，测量此时的电压，根据试验电流调节电压到所需电压值，如电流先调节的是 20% 的试验电流，则电压增加到 5 倍，如电流先调节的是 50% 的试验电流，则电压增加到 2 倍，然后闭合试验回路，再经过稳流，实现试验电流的快速调节，并大大减少了调节电流时产生的热对保护特性试验结果的影响。电流调节流程图如图 5.4-7 所示，调/

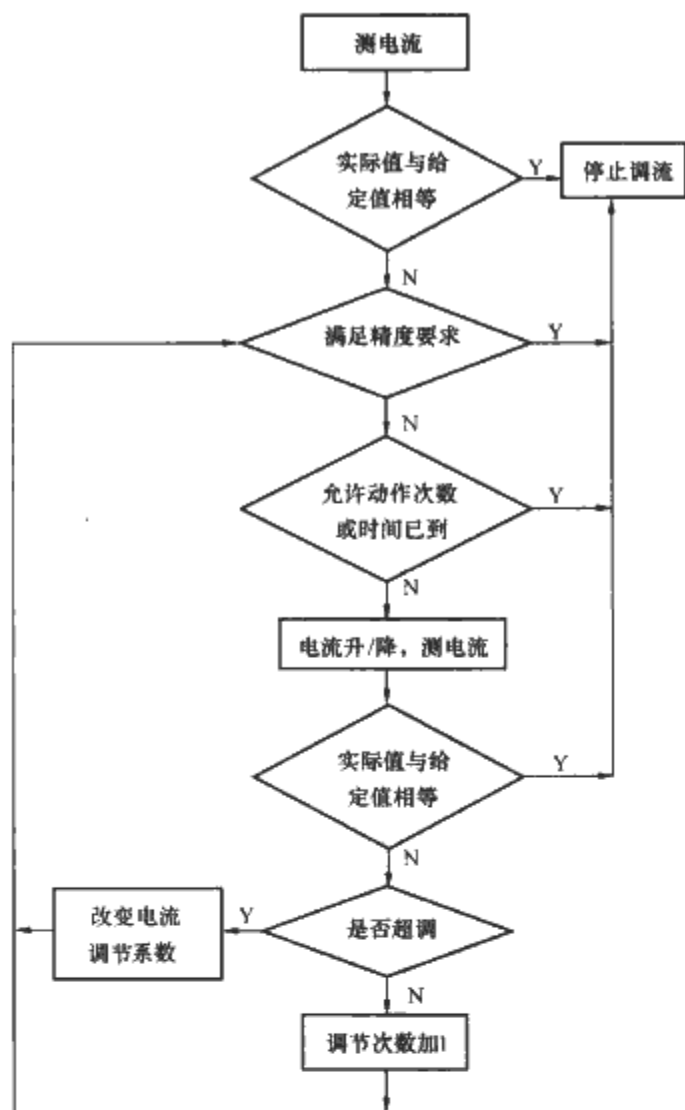


图 5.4-7 调/稳流控制流程图

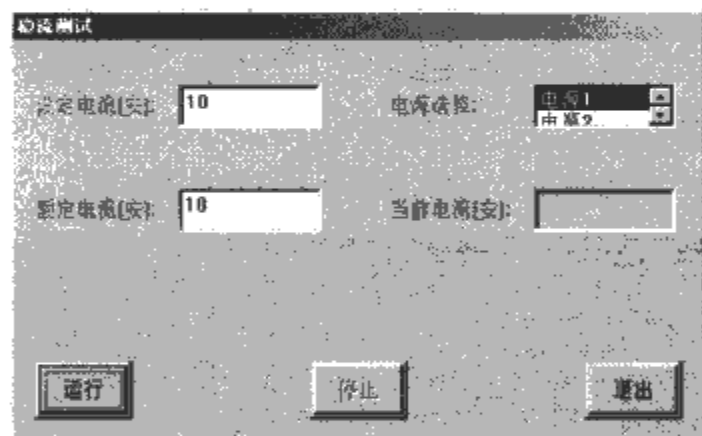


图 5.4-8 调/稳流控制模块的操作界面

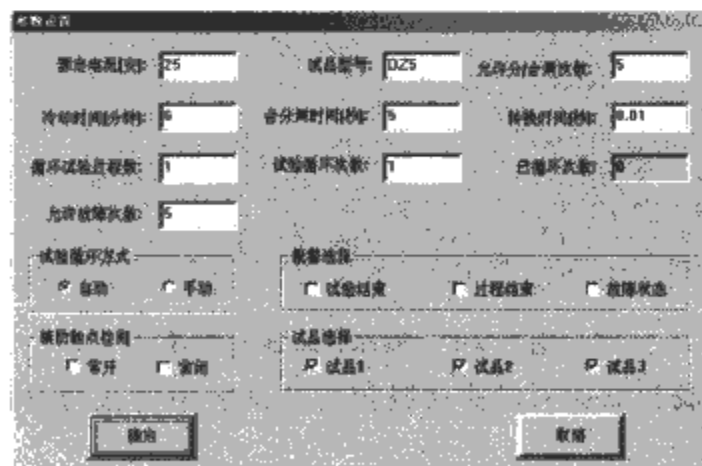


图 5.4-9 循环参数设置操作界面

时,通常只读(测)第一台断路器的峰值表数值,而以后就不再检测试验电路的电流。这种校验方法是不妥的,因为材料和工艺的原因,每台断路器甚至同一台断路器的不同极的内阻值都不相同,特别是额定电流小的断路器,每极的差异就更大。因此,实际通过断路器的电流值也就不相同,这样校验过的断路器,其整定值存在误差。



图 5.4-10 过程参数设置操作界面

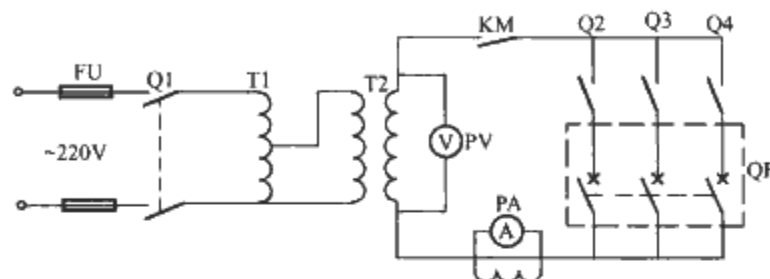


图 5.4-11 瞬时校验台主电路

FU—熔断器; Q1—刀开关; T1—自耦调压器; T2—大电流变压器; KM—接触器; Q2、Q3、Q4—刀开关; PV—电压表; PA—电流表; QF—被试品

(3) 合闸相角不同。在进行瞬动特性试验时,交流电压是随机施加的,通过脱扣器线圈的电流瞬时值为

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) - I_m \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{\omega t}{\tan \varphi}} \quad (5.4-1)$$

式中: ψ 为电压合闸相角; φ 为试验电路功率因数角; I_m 为电流周期分量的峰值。

式(5.4-1)中右边第一项是周期分量,第二项是一衰减的非周期分量。由此可见,非周期分量与电压合闸相角 ψ 有关。由于合闸相角不同,随机出现大小不一的试验电流,使实际整定电流不统一,可能造成在整定电流的 80% 时动作或在整定电流的 120% 时不动作。因此,合闸瞬间电路电流非周期分量对断路器的整定电流值有很大影响。

(4) 试验回路电阻的变化。在试验过程中室温可能发生变化,温度变化导致试验回路阻抗也随之变化。另外,在开始试验时试验回路阻抗处于冷态,而经过一段时间的试验后,试验回路阻抗处于热态。因此,由温度引起试验回路阻抗的变化,会影响试验电流的设定值。

2.2.2 瞬动特性试验中暂态过程分析

2.2.2.1 试验电路

塑壳断路器瞬动特性试验对试验电路的要求是:对于配电用塑壳断路器,试验电路能提供的瞬校电流应为 $10I_N$,其误差为 $\pm 20\%$;对于控制电动机用塑壳断路器,试验电路能提供的瞬校电流应为 $12I_N$,其误差为 $\pm 20\%$ 。并要求试验电路具有定时断开功能。目前,塑壳断路器瞬动特性试验常采用的原理电路如图 5.4-12 所示。

电路由自耦调压器 T1、大电流变压器 T2、控制接通接触器 K1 以及延时分断时间继电器 K2 组成。利用时间继电器常闭触点的延时分断功能,定时分断电路。

根据塑壳断路器脱扣要求,按照表 5.4-1 来判定试品是否合格。表中 t_T 为产品标准规定的脱扣时间极限,根据不同型号产品要求不同,一般为 100~200ms。具体的试验方法是:

(1) 投入试品, K1 闭合,通过调压器调整,使得试验回路中的电流等于 I_N ,记录此时调压器输出电压 U_N ,断开 K1。

(2) 调整调压器输出到 $8(9.6)kU_N$, $k > 1$,其大小与

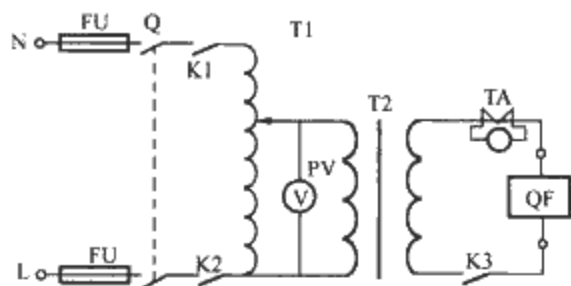


图 5.4-12 型壳断路器瞬动特性试验原理电路图
FU—熔断器；Q—刀开关；T1—自耦调压器；T2—大电流变压器；K1—接触器；K2—延时继电器；K3—接触器；PV—电压表；TA—峰值电流表；QF—被试品

调压器和大电流变压器的内阻有关， k 可根据经验设定，其目的在于保证试验回路中得到 $8(9.6)I_N$ 。K1 闭合，接通电路并观察试品是否脱扣。

表 5.4-1 塑壳断路器瞬动特性要求			
配电类断路器	施加电流	$8I_N$	$12I_N$
	脱扣时间	$\geq t_T$	$\leq t_T$
控制电动机类断路器	施加电流	$9.6I_N$	$14.4I_N$
	脱扣时间	$\geq t_T$	$\leq t_T$

(3) 调整调压器输出到 $12(14.4)kU_N$ ， k 的选择原则同上，K1 闭合，接通电路，观察试品是否脱扣。

(4) 根据试品脱扣情况判定试品是否合格。

从上述试验方法中可以看出，在对试品施加 $8(9.6)I_N$ 和 $12(14.4)I_N$ 时，是通过对试品施加 $8(9.6)kU_N$ 和 $12(14.4)kU_N$ 电压来实现的。这是因为在对塑壳断路器试品施加 $8(9.6)I_N$ 和 $12(14.4)I_N$ 时，可能引起试品脱扣，试验装置没有时间通过一定的控制手段来保证电流的精度，所以只能通过控制电压间接保证电流的精度。控制原理可用式(5.4-2)、式(5.4-3)解释

$$U_N = I_N Z \tag{5.4-2}$$

$$8(9.6)I_N = \frac{8(9.6)kU_N}{Z^*} \tag{5.4-3}$$

由式(5.4-2)得出 I_N 对应的 U_N ； Z 是试验回路的阻抗，包括塑壳断路器触头电阻、脱扣检测机构以及调压器、变压器的阻抗。

在对试品施加 $8(9.6)I_N$ 时，由于调压器改变位置，式(5.4-3)中回路阻抗变为 Z^* ，一般情况下 $Z^* > Z$ ，因此对试品施加的电压应为 $8(9.6)kU_N$ ，为了保证试验回路产生 $8(9.6)I_N$ ， k 应当满足式(5.4-4)，即

$$k = \frac{Z^*}{Z} \tag{5.4-4}$$

由于随着调压器位置的改变，阻抗的变化无特定的规律， k 值只能靠经验来估算。

从稳态意义上来说，在试验过程中，通过准确估算 k 值和保证电压精度，可以得到准确的试验电流，但是，对于暂态来说得到准确的试验电流就比较困难了。

当电路中存在电感或电容特性负载时，在合闸瞬间，流过触头的电流包括稳态分量和暂态分量，稳态分量又称为周期分量，暂态分量又称为非周期分量。由于非周期分量的存在，使得电流峰值加大。有可能造成施加 $8(9.6)I_N$ 时，不该脱扣的合格试品脱扣；而施加 $12(14.4)I_N$ 时，不合格试品脱扣，从而造成对断路器瞬动特性的检测误差。因此，消除暂态电流(非周期电流)对试验的影响是非常重要的。

2.2.2.2 暂态电流

由于试验过程中电流的非周期分量影响试验结果，必须加以消除。

(1) 电流非周期分量的产生。电流非周期分量产生的原因，首先应从试验的主电路着手分析。图 5.4-12 的等效电路如图 5.4-13 所示。

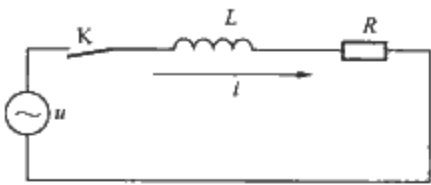


图 5.4-13 型壳断路器瞬动特性试验回路等效电路图

开关 K 闭合瞬间，电路的电压平衡方程式为

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} \tag{5.4-5}$$

式中： u 为电源电压，假设合闸瞬间的电源电压为

$$u = U_m \sin(\omega t + \phi) \tag{5.4-6}$$

将式(5.4-6)代入式(5.4-5)可解得

$$i = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \phi - \varphi) - \frac{U_m}{Z} \sin(\phi - \varphi) e^{-\frac{t}{T}} \tag{5.4-7}$$

式中： $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ 为回路阻抗； $\varphi = \arccos \frac{R}{Z}$ 为功率因数角； $T = \frac{L}{R}$ 为电路时间常数。

将 $\frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \phi - \varphi)$ 记作 i_1 ，将 $\frac{U_m}{Z} \sin(\phi - \varphi) e^{-\frac{t}{T}}$ 记作 i_2 。从式(5.4-7)可见， i_2 是随时间按指数规律衰减的分量，随着时间的延长，其数值逐渐趋于 0，该分量是非周期分量。 i_1 是时间的周期函数，它的有效值为 $I_1 = \frac{U_m}{\sqrt{2}Z}$ ，是希望得到的试验电流。 ϕ 是合闸时的电压相位，它直接影响试验电流非周期分量的大小。

(2) 试验电流非周期分量的影响。合闸瞬间所产生的电流 i 包含两个部分： i_1 和 i_2 。 i_1 是周期分量，是用户想要得到的试验电流；而 i_2 是非周期分量，它是一个暂态过程，是试验中不希望产生的。下面分析它对试验的影响。

首先讨论一种极端的情况

$$\phi - \varphi = -\frac{\pi}{2} \tag{5.4-8}$$

将式(5.4-8)代入 i_1 、 i_2 和 i 得

$$i_1 = -\frac{U_m}{Z} \cos \omega t \tag{5.4-9}$$

$$i_2 = -\frac{U_m}{Z} e^{-\frac{t}{T}} \tag{5.4-10}$$

$$i = \frac{U_m}{Z} (e^{-\frac{t}{T}} - \cos \omega t) \tag{5.4-11}$$

图 5.4-14 给出了 i 和 i_1 对照波形。实线为 i 的波形，虚线为 i_1 波形。

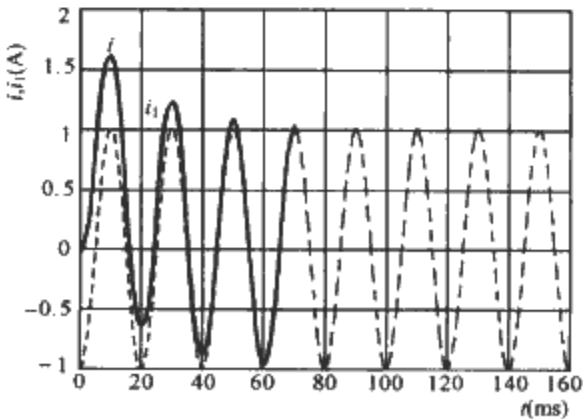


图 5.4-14 型壳断路器瞬动特性试验电流波形

从图 5.4-14 中可见, i 的峰值比 i_1 的峰值要大出 60%, 即实际产生的试验电流为需要的试验电流的 1.6 倍。按照这个倍率, 要产生 $8(9.6)I_N$, 而实际上产生的是 $12.8(15.4)I_N$, 这样, 大部分的断路器都要脱扣。

图 5.4-15 给出了塑壳断路器瞬动特性试验合闸相角与电流峰值的关系。图中横坐标代表 $\psi-\varphi$, 单位为弧度; 纵坐标代表 i 与 i_1 的峰值比。从图中可见当 $\psi-\varphi=\pm\frac{\pi}{2}$ 时, 产生的电流与期望电流相差最大。当 $\psi-\varphi=0$ 时, 产生的电流与期望电流相同。

综上所述, 在进行塑壳断路器瞬动特性试验时, 合闸瞬间电流产生的非周期分量的大小与合闸时电源电压的相位有关, 即与合闸相角有关。当合闸相角等于试验电路的功率因数角时, 不产生电流的非周期分量。

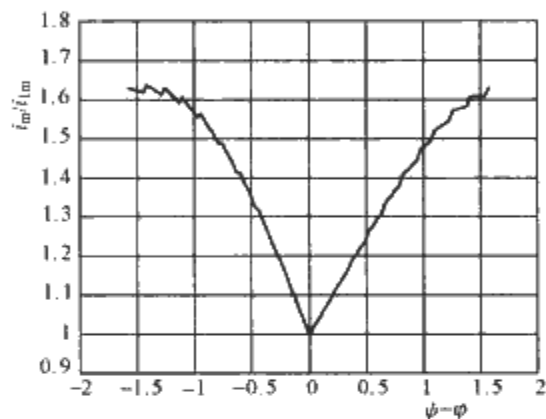


图 5.4-15 塑壳断路器瞬动特性试验合闸相角与电流峰值的关系

为了消除电流中的非周期分量, 要求合闸相角等于试验电路的功率因数角。为此, 首先要检测试验电路的功率因数角。为了达到较准确的测量精度, 可以采用快速傅里叶变换方法, 根据检测到的试验回路电压、电流的信号, 计算电路的功率因数角, 在此基础上, 进一步实施选相合闸方案。

2.2.3 瞬动特性调试装置

2.2.3.1 功能和技术性能

塑壳断路器瞬动特性调试装置的主要技术性能如下:

- (1) 可消除传统的塑壳断路器瞬动特性调试装置产生的非周期试验电流分量对瞬动特性调试的影响。
- (2) 调试装置可快速准确地获取试验所需的大电流。
- (3) 调试装置具有多个调试检测挡位, 可根据调试试验要求, 将试品连接到相应的检测挡位。
- (4) 根据试验的要求, 试验人员可以利用计算机界面, 输入试品额定电流数值、下限电流倍数、上限电流倍数及脱扣时间等参数。
- (5) 具有完整的数据保护功能, 意外断电后数据不丢失, 电源恢复后不破坏已采集的数据。
- (6) 试验装置能自动记录试验结果, 可以输出打印检测数据和检测波形。
- (7) 试验过程中, 计算机进行操作提示, 可减少误操作。

2.2.3.2 硬件设计

塑壳断路器瞬动特性调试装置的硬件设计, 主要包括以下方面:

(1) 硬件的组成。塑壳断路器瞬动特性调试装置由计算机控制柜和工作柜两大部分组成。调试装置的原理框图如图 5.4-16 所示。计算机控制柜由工业 PC 机、检测电路和控制电路等组成。工作柜主要由电动调压器、大电流变压器组成, 调试装置上有 2 个接线端子, 可以连接 1 台试品。

试验回路检测电路的主要功能是检测试验回路的电压、

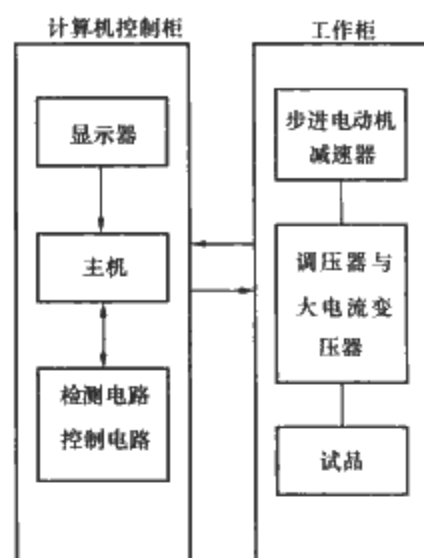


图 5.4-16 塑壳断路器瞬动特性调试装置的原理框图

电流、功率因数及电压相位。该电路通过光电隔离后, 将信号电平送至工控机。

控制回路主要由接触器、控制继电器和固态继电器组成。其中 2 只控制继电器用于控制步进电动机的正反转, 以增加或减小试验回路的电流。

(2) 硬件电路。塑壳断路器瞬动特性调试装置的硬件电路包括主回路、计算机控制与检测电路两大部分。主回路提供塑壳断路器瞬动特性试验的电流。计算机控制与检测部分主要完成试验时序控制、试验参数检测、试验波形与数值的显示、接收用户的参数设定、试品合格状态判定与存储以及数据处理等功能。

1) 试验设备主回路设计。进行塑壳断路器瞬动特性试验时, 施加的电流与脱扣要求见表 5.4-1。调试装置主电路如图 5.4-17 所示。电路主要由电动自耦调压器 T1、交流固态继电器 ACSSR、大电流变压器 T2、检流电阻 R_1 、平衡电阻 R_2 以及若干个控制接触器 KM1~KM5 组成。

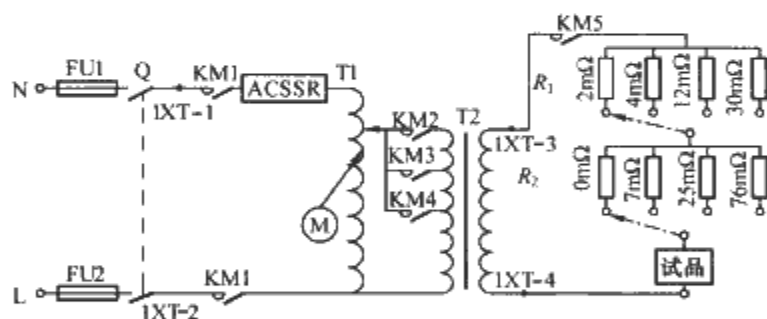


图 5.4-17 塑壳断路器瞬动特性试验设备主回路

电动调压器 T1 通过控制电动机旋转, 实现试验电流调节。电动机正转时, 调压器输出电压上升; 电动机反转时, 调压器输出电压下降。大电流变压器 T2 的一次侧有三个抽头, 分别与 KM4、KM3 和 KM2 连接。对塑壳断路器进行测试时, 先将 KM2、KM5 闭合, 通过电动调压器的调节, 使得试验回路中的电流达到额定电流。假设此时 1XT-3 和 1XT-4 之间的空载电压为 U_N , 当 KM2 断开 KM3 闭合时, 1XT-3 和 1XT-4 之间的空载电压就为 $8U_0$; 当 KM3 断开 KM4 闭合时, 1XT-3 和 1XT-4 之间的空载电压就为 $12U_0$ 。此时配合电动调压器的调节, 消除变比不准所造成的电压误差, 可以快速准确地调出要求的试验电流 $8I_N$ 和 $12I_N$ 。

I_N 为 6~225A 时, 需要检测的电流为 6~3240A, 检测范围非常大, 为了提高检测精度, 检流电阻 R_1 分为 4 挡, 根据试品的额定电流, 将试品连接到相应的挡位上。平衡电阻 R_2 的作用是使电动调压器 T1 工作在高压区, 以提高调节的相对精度。平衡电阻 R_2 对应检流电阻 R_1 也被分为 4 挡。参数计算如下:

a) 按照塑壳断路器的额定电流，将检测分为四挡。测量分挡见表 5.4-2。

表 5.4-2 测量分挡				
挡位编号	1	2	3	4
额定电流范围 (A)	100~225	40~100	16~40	6~16

b) 选择检流电阻 R_i 设计。一般来说，AD 采集板检测信号的范围为 $\pm 10V$ ，交流峰值与有效值的比是 $\sqrt{2}$ 。因此，检测交流电压有效值的范围为 $\pm 7V$ 。各个回路的电流检测范围是从下限额定电流到上限额定电流的 14.4 倍。表 5.4-3 给出各个挡位选取的检流电阻，以及检流电阻上的电压范围。

表 5.4-3 检流电阻与检流电压范围				
挡位编号	1	2	3	4
检流范围 (A)	100~3240	40~1440	16~576	6~230
检流电阻 (mΩ)	2	4	12	30
检流电压范围 (V)	0.2~6.5	0.16~5.8	0.19~6.9	0.18~6.9

c) 变压器二次侧电压设计。变压器二次侧输出电压应等于试验回路总电阻（包括变压器内阻）与最大电流（3240A）的乘积。假设试品电阻、变压器电阻及导线电阻之和为 $6m\Omega$ ，再加上检流电阻 $2m\Omega$ ，共计 $8m\Omega$ 。这样变压器二次侧最大输出电压为 $26V$ ，考虑一定的设计裕量，设计为 $27V$ 。

d) 平衡电阻 R_2 设计。调压器的输出电压是有级的，为了减小有级调整所造成的相对误差，希望其尽可能地工作在高压端。根据表 5.4-3 中的检流电压范围，再考虑试品电阻、导线电阻及变压器内阻上的压降，1 挡变压器二次侧工作电压范围是 $0.2\sim 6.5V$ ，通过 KM_4 、 KM_3 和 KM_2 的切换，折算到一次侧的电压范围的最大值为 $(26\times 8)V=208V$ ；电压范围的最小值为 $(0.8\times 8\times 12)V=76.8V$ 。4 挡变压器二次侧工作电压范围是 $0.216\sim 8.28V$ ，折算到一次侧的工作电压范围只有 $20.7\sim 66.24V$ 。1、4 两挡工作电压范围相差过大，引入平衡电阻可以补偿该缺陷。表 5.4-4 给出加上平衡电阻后的电压工作范围。

表 5.4-4 加上平衡电阻后的电压工作范围				
挡位编号	1	2	3	4
电流检流范围 (A)	100~3240	40~1440	16~576	6~230
检流电阻 (mΩ)	2	4	12	30
平衡电阻 (mΩ)	0	7	25	76
总电阻 (mΩ)	8	17	43	112
二次电压范围 (V)	0.8~26	0.7~24.5	0.7~24	0.7~25.8
调压器输出电压范围 (V)	77~208	67~196	67~192	67~206

2) 计算机检测与控制电路设计：

a) 检测电路。塑壳断路器瞬动特性试验中需要检测的信号包括电源电压 U_y 、大电流变压器输出电压 U_i 以及通过试品的额定电流 I_N 等三个参数，在图 5.4-18 中标出了三个重要检测的参数，其中 R_c 为检测回路电流而设置的分流器。

这些检测信号经过隔离处理后调理成 A/D 量程以内的信号。电源电压 U_y 信号使用隔离变压器，电压比为 62，这样对应 $250V$ (AC) 电压的最大峰值为 $\pm 250\sqrt{2}V\div 62=\pm 6V$ ，限制在 A/D 量程以内。大电流变压器输出电压 U_i 和回路电流 I_N 信号，通过隔离模块输入到计算机。计算机 A/D 板选用研华 PCL 818HG，单端工作方式，输入信号量

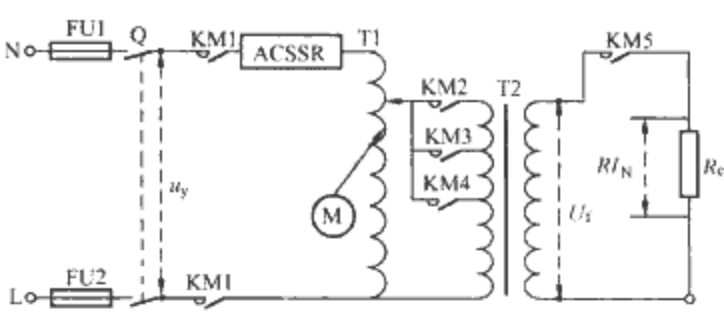


图 5.4-18 参数检测位置示意图

程为 $\pm 10V$ 。信号采集示意图如图 5.4-19 所示。

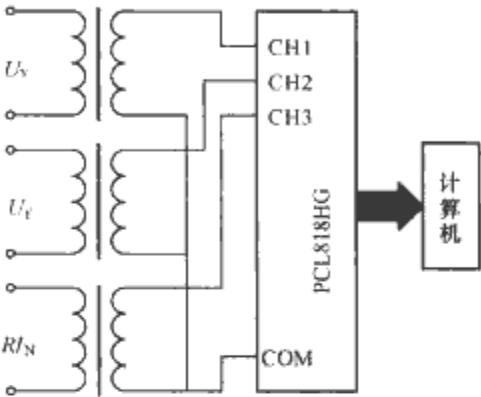


图 5.4-19 信号采集示意图

b) 控制电路。图 5.4-20 给出了控制电路原理图。K1 和 K2 用来控制电动调压器的电动机正反转运行，二者需要互锁。计算机通过 I/O 板控制交流固态继电器 ACSSR，实现对继电器 K1 和 K2 以及接触器 KM_1 至 KM_5 励磁线圈的上电控制；并通过直流固态继电器来控制选相开关，以实现选相合闸。

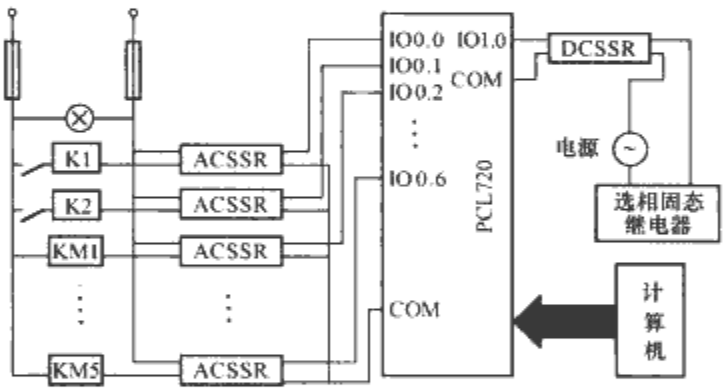


图 5.4-20 控制电路原理图

塑壳断路器瞬动特性试验时，试验电流是通过控制电动调压器的输出电压来实现的。电动调压器是由调压器、与调压器同轴连接的减速器及伺服电动机组成。

2.2.3.3 软件设计

塑壳断路器瞬动特性调试装置的软件设计，主要包括以下几个技术问题：

(1) 为了实现塑壳断路器瞬动特性的控制时序，以及对试验参数的采集，计算机需要实现定时操作，即计算机的定时中断技术。

(2) 为了便于用户监视试验的全部过程，以及方便用户的使用，软件系统需要设置为图形方式，实时绘制试验参数的动态曲线。

软件主要功能如下：

1) 试验参数设置。接受用户设定的试品名称、额定电流、上限电流倍数、下限电流倍数、脱扣时间极限等参数。

2) 控制进行试验。控制产生额定电流、用户规定的下限电流以及上限电流；采集电压、电流值；判定试品的脱扣情况；计算功率因数角，实现选相合闸。采用定时操作技术，根据控制时序各个分量的时间要求，控制各接触器的状态，以及控制试验电压。检查是否产生故障，当产生故障

时，保存故障数据。在完成控制的同时，实时显示试验参数以及参数动态曲线。

3) 试验数据显示及打印。提供用户查阅试验数据。

通过以上对系统需求的分析，软件系统应当包含四个层次的功能模块，前三个层次模块的调用关系见图 5.4-21。

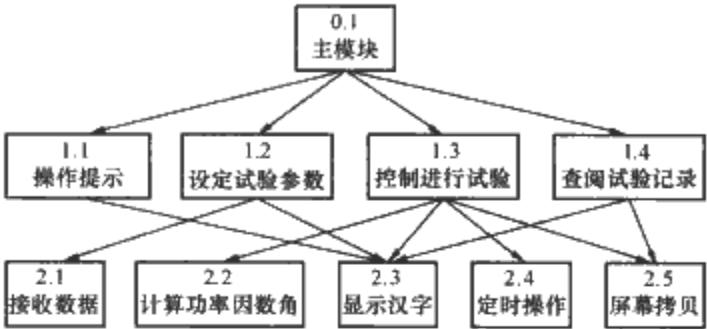


图 5.4-21 模块结构图

利用计算机控制的塑壳断路器瞬动特性试验可以快速准确地得到试验电流，消除了非周期电流，试验准确度高。利用计算机数字式控制方式，还可以方便地分析瞬动特性的精确度，为不断改进产品质量提供了精确的试验数据。

2.3 机械操作测试技术

2.3.1 操作可靠性试验装置的技术性能

塑壳断路器操作可靠性试验装置应具备如下技术性能：

- (1) 塑壳断路器操作可靠性试验装置由计算机控制柜和试验台组成。
- (2) 装置可进行不同电流等级的塑壳断路器机械操作试验。
- (3) 每种规格可以同时进行 4 台试品的试验，试验电压为直流 24V，试验电流为每极 1A，共有 24 个试验回路。
- (4) 试验台具有可控的气动夹紧和出线端连接气动压紧装置。
- (5) 试验装置上有 1 个电压表、8 个电流表。可以通过波段开关选择试品上的任一极进行电流显示。操作面板分为夹具面板和接线面板。

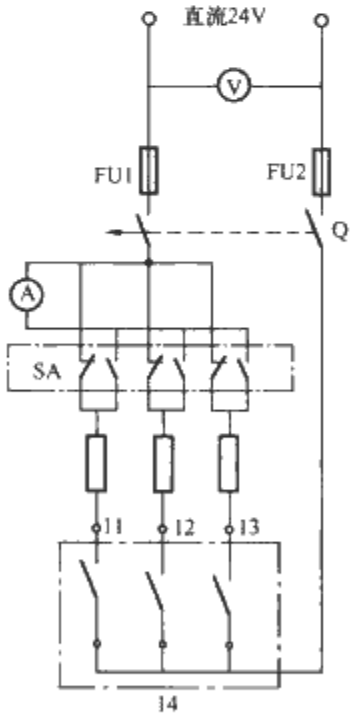


图 5.4-22 操作可靠性试验装置主电路

(6) 每个试验回路具有一个 24Ω、100W 的线绕电阻，电阻温度特性好。

(7) 试验台与计算机控制柜的接口简洁。

2.3.2 操作可靠性试验装置的硬件

塑壳断路器操作可靠性试验装置的硬件包括以下方面：

- (1) 主电路。每个试验回路具有一个 24Ω、100W 的线绕电阻，该电阻的温度特性好，并不受发热的影响，如图 5.4-22 所示。
 - (2) 试验激励控制回路。
 - 1) 电动操动机构。电动合闸与电动分闸示意图如图 5.4-23 所示。
 - 2) 欠电压脱扣机构。欠电压脱扣机构控制示意图如图 5.4-24 所示。
 - 3) 分励脱扣机构。分励脱扣机构控制示意图如图 5.4-25 所示。
- 通过以上电路，可以方便设计出塑壳断路器的机械操作

试验程序。

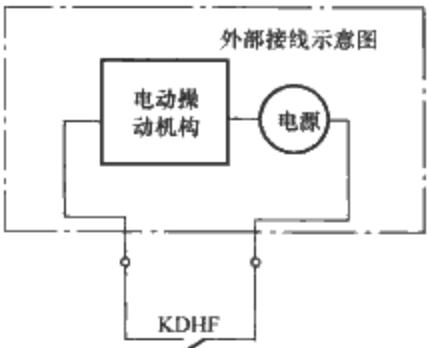


图 5.4-23 电动合分闸示意图

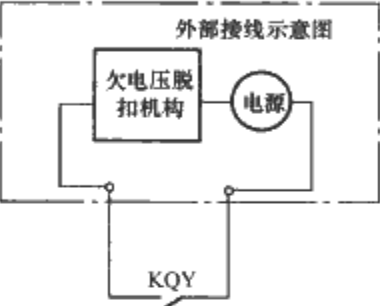


图 5.4-24 欠电压脱扣机构控制示意图

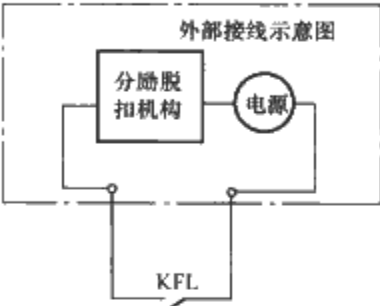


图 5.4-25 分励脱扣机构控制示意图

3 接触器寿命试验技术

3.1 试验方法

接触器是电气传动和自动控制系统中应用最广的一种电器，它适用于远距离频繁地接通和分断交、直流主电路及大容量控制电路。依靠电磁系统来操作主触头，主触头串接于主电路中，用于接通和分断大电流。电磁系统的线圈接于控制电路中，用较小励磁电流即可控制，这样便可以实现控制电路的功率放大和对主电路设备进行远距离的自动控制。

由于在自动控制系统中要求接触器的操作频率很高，如每小时 300 次、600 次，甚至高达 3000 次，为了保证一定的使用期限，接触器必须具有足够长的机械寿命和电气寿命。机械寿命是指接触器承受机械磨损的能力，用无负载（即不带电）下的操作次数表示。电气寿命是指在额定条件下带电操作的极限次数。一般要求机械寿命为数百万次甚至一千万次以上，电气寿命按不同的使用类别和不同的机械寿命级别，有一定的百分比，一般为机械寿命的 5%~20%。

根据使用场合的不同，应选用不同技术参数的接触器。接触器的主要技术参数包括额定电压、额定电流、动作性能、接通与分断能力、操作频率与工作制。额定电压指在规定的工作条件下，保证接触器主触头正常工作的电压值。额定电流指在额定工作条件下，保证接触器主触头正常工作的电流值。动作性能是确保接触器在规定的控制电源电压变化范围内可靠地吸合和释放。操作频率指接触器每小时允许的操作次数。操作频率越高，接触器的工作任务就越重。

接触器工作制一般分为四种：八小时工作制、长期工作制、反复短时工作制和短时工作制。

接触器最重要的一项电气指标是它的额定接通与分断能力，即主触头在规定的条件下能可靠地接通与分断的最大电流值。根据不同的控制对象及操作条件，国际电工委员会标准（IEC 60947-4）规定将交流接触器的使用范围分为几种使用类别：AC1、AC2、AC3 和 AC4 等。

3.2 试验的计算机控制技术

3.2.1 交流接触器电寿命试验

交流接触器电寿命是指在规定的正常工作条件下，不需

要修理或更换零件而能承受的负载操作循环次数。对于交流接触器来说，一个操作循环包括闭合一次和断开一次。电寿命试验的目的就是考核接触器在规定的试验条件下能否达到规定的电寿命次数。

进行交流接触器电寿命试验时，试验电源、试验负载及试验电路等应满足下列要求：

(1) 试验电源。交流电源可以是发电机或电源变压器，电源控制电压波形基本上为正弦，电源频率应为试品的额定频率，其波动应不大于±5%。

(2) 试验负载。

1) 负载电路由空心电抗器和电阻器相串联以及与它们并联的电阻、电容（在分断时用来调节瞬态恢复电压）组成。

2) 在包括大型空心电抗器试验电路的瞬态恢复电压特性不能代表通常使用条件的情况下，每相空心电抗器应并联电阻，电阻分流大小应取通过电抗器电流的0.6%，如果电抗器接在变压器的一次侧，则无需接入分流电阻。

3) 当试验电流小于100A时，可以采用有气隙的铁心电抗器。

4) 如果各个电抗器的时间常数之差与平均值之比不大于5%，则允许多个电抗器的并联连接。

(3) 试验电路。

1) 根据产品标准或技术条件的规定，连接电源、试品及负载。

2) 除产品标准或技术条件中另有规定外，试验电路应有一点接地，但不许有两点接地。

在试验中试验参数的测定及允许误差如下：

a) 在整个电寿命试验过程中，每隔一定时间，测量一次电源的空载电压，以各次测量值的平均值作为试验电压，并记入试验报告中，电压的允许误差为±5%。

试验电流可以通过电流互感器（或分流器）用电流表（或毫伏表）直接测量，以换算至平均电压下的电流值为准，并记入试验报告中，电流的允许误差为±5%。

b) 应根据示波图或用其他方法对电流、电压波形的正弦性以及通电时间进行一次性测定。测量电流波形的仪器不应该对瞬态过程造成不允许的失真。

c) 功率因数可以用取自电源的电压信号和取自互感器的电流信号，通过仪表进行测量。其允许误差由产品标准或技术条件规定。

3.2.2 试验主电路设计

由于交流接触器电寿命试验存在接通条件和分断条件不相同的试验方式，因此对试验电路的控制要求较高。交流接触器电寿命试验主电路包括电源、模拟负载和试品三部分，如图5.4-26所示。

交流接触器主要用来控制功率较大的电动机，一般为三极式。QF为断路器，控制主电路的电源，在试验时，可以用作试品故障的后备保护。主电路电源为三相电源，并有1/6电压电源，满足AC3的分断试验条件，利用陪试接触器K1和K2的切换使试品KM1、KM2和KM3上施加额定电压或1/6额定电压。R为电阻器，L为空心电抗器，它们是可调的，用来调节功率因数和负载电流。通过控制接触器K1、K2、KM1、KM2、KM3不同的动作次序，实现不同的试验方式。控制接触器K1和K2作为陪试品，其本身也存在寿命问题，因此要定期更换。同时，设计控制时序时，要考虑陪试接触器本身存在的吸合和释放时间。

3.2.3 试验时序的控制

交流接触器使用类别不同，接通和分断时的电压、电流

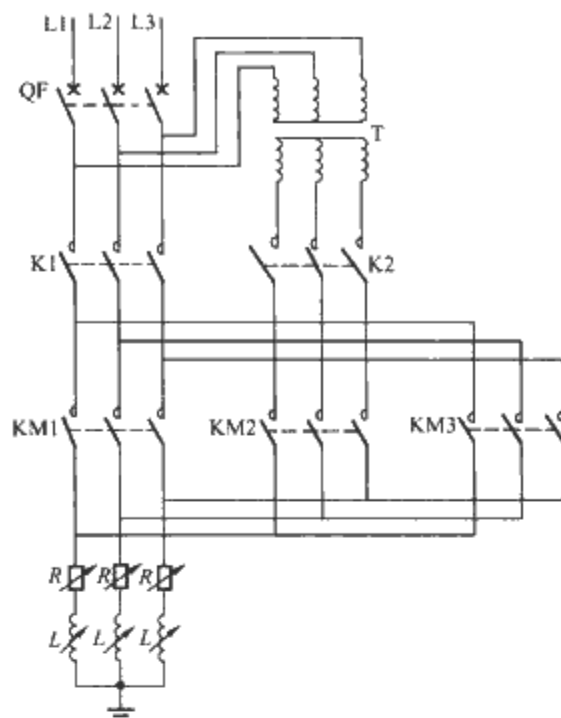


图 5.4-26 交流接触器寿命试验主电路图

也不同，在交流接触器的接通与分断时刻，应切换相应的接触器K1和K2，来满足寿命试验时接通与分断的电压、电流。根据需要设计了五种试验方式：接通试验、额定接通与分断能力试验、约定操作性能试验、电寿命试验和机械寿命试验。接触器动作的主要时序图如图5.4-27、图5.4-28、图5.4-29所示，在图中，用曲线的低表示接触器的释放状态，用曲线的高表示接触器的吸合状态，从低变高表示吸合过程，从高变低表示释放过程。根据接触器的实际吸合、释放时间和试验要求可以设置各状态的时间。

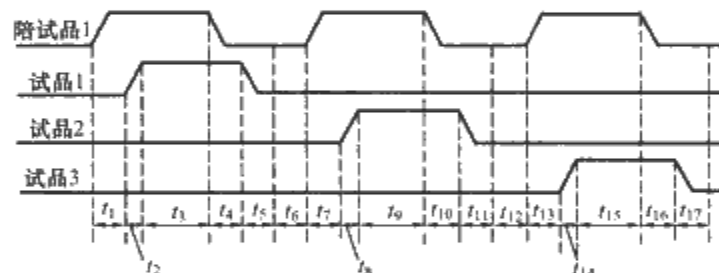


图 5.4-27 接通试验时试品的动作时序图

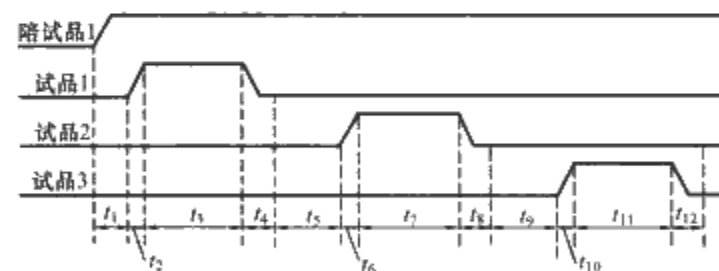


图 5.4-28 接通与分断试验时试品的动作时序图

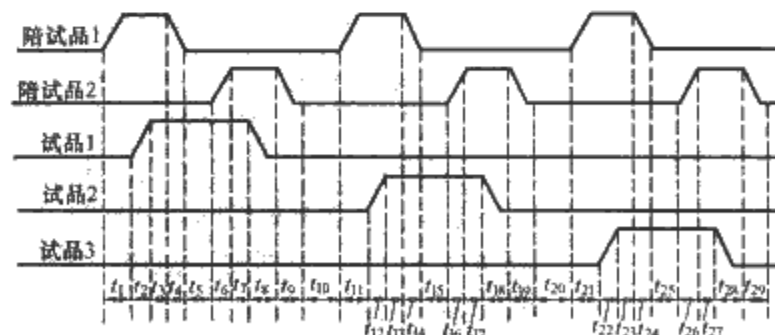


图 5.4-29 电寿命试验（AC3）时试品的动作时序图

3.3 交流接触器寿命试验装置

3.3.1 硬件设计

3.3.1.1 装置的总体要求

交流接触器寿命试验装置的总体要求如下：

(1) 设计要求。交流接触器寿命试验装置应能完成不同使用类别下的交流接触器寿命试验，其主要技术性能如下：

- 1) 能够根据试验要求进行试验条件的调整，为交流接触器试验提供不同的电压和电流。
- 2) 装置能够对 AC1、AC2、AC3、AC4 使用类别的交流接触器分别进行试验，满足相应的接通与分断的负载条件。
- 3) 装置能实时检测电源电压、1/6 电源电压、触点间电压和主电路电流，进行数据显示，并根据触点间电压判断试品的失效情况。
- 4) 发生失效故障时，装置能发出报警，提示用户。
- 5) 装置在时间允许的条件下，应能同时对多个试品进行试验。

(2) 硬件总体设计。交流接触器寿命试验装置采用计算机直接控制，计算机应采用工控机，以提高可靠性。检测信号包括试品断口电压 U_a 、 U_b 、 U_c ，三相电源电压 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ca} ，三相试验电流 I_a 、 I_b 、 I_c 。可以选择 380V、660V、1140V 三个电压检测通道，实现对不同电压等级试品的检测，并采用高精度电流互感器检测三相试验电流。

3.3.1.2 电路设计

由于试验电路中有两种不同电源，陪试品和试品的动作时序有一定要求。通过控制主电路中 K1 和 K2 的接通与分断，实现电源电压与 1/6 电源电压的切换，以满足交流接触器接通与分断时的电压、电流要求。试品的控制方式有两种：①采用交流固态继电器控制，适用于容量较小的交流接触器；②用中间继电器控制，适用于大容量交流接触器及直流线圈的接触器。图 5.4-30 为一个主电路带多个试品时的控制线路图。

其中，K1 的励磁回路中串入 K2 的辅助动断触点，K2 的励磁回路中串入 K1 的辅助动断触点，形成互锁，防止 K1 与 K2 同时吸合造成电源短路。同时在接触器 K2 与 K1 通电、断电之间保证有一定的时间间隔。

从图 5.4-30 中可以看到，当数字输出口的某一位输出为 1（高电平）时，固态继电器的输出端导通，即电源与试品线圈构成的回路导通，此时试品的动合触点闭合、动断触点断开。

3.3.1.3 数据采集电路设计

交流接触器寿命试验装置要求实时检测电源电压、1/6 电源电压、触点间电压和主回路电流信号，由于这些信号都是 50Hz 工频信号，根据采样定理，信号采样频率应该在 500Hz 以上才能平滑地描述信号。A/D 板的最大输入是 10V，主回路中的电压电流信号都是强电信号，不能用 A/D 板直接采集，并且主回路应与计算机测控电路隔离，所以采集前应对信号进行隔离、降压处理。

图 5.4-31 为交流接触器寿命试验装置数据采集电路。电源相电压 (U_N)、触点电压 (U_c) 通过降压电阻，降到 0.6V 左右，然后通过 2 级放大器和光电隔离，将电压信号转换为 A/D 板可以采集的模拟信号，主回路电流通过在主回路中串入检流电阻，将电流信号转换为电压信号，再通过放大器和光电隔离转换为 A/D 板可以采集的模拟信号。

3.3.2 软件设计

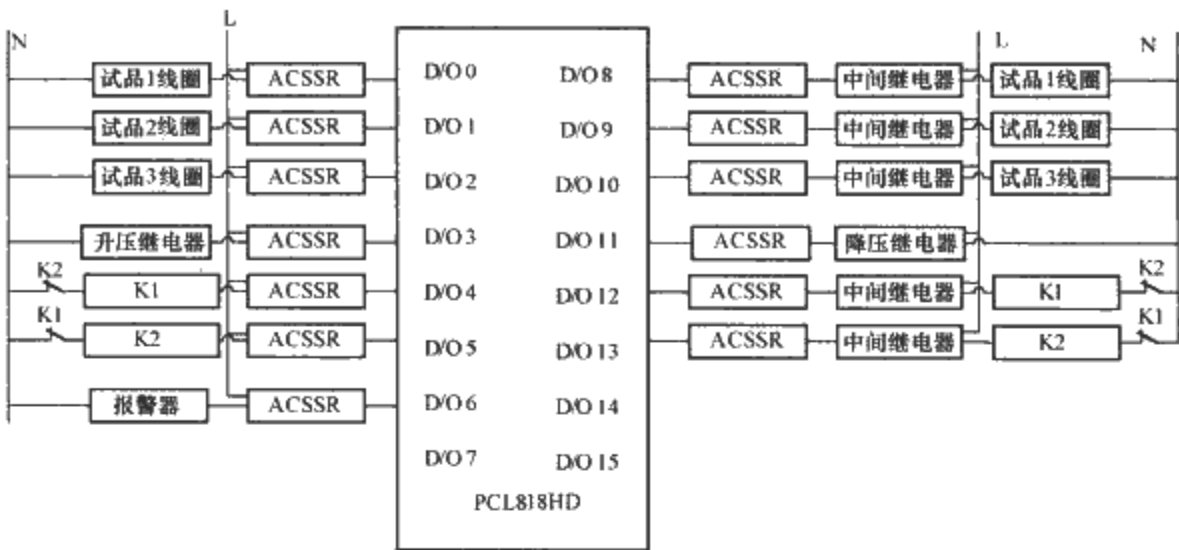


图 5.4-30 交流接触器寿命试验装置控制电路图

控制软件是系统的核心，它在硬件的基础上按照不同的试验时序，实现交流接触器在各种使用类别下的电寿命试验。软件系统同时具有文件、参数设置、查看、调试、试验运行和帮助等菜单，方便用户的操作。

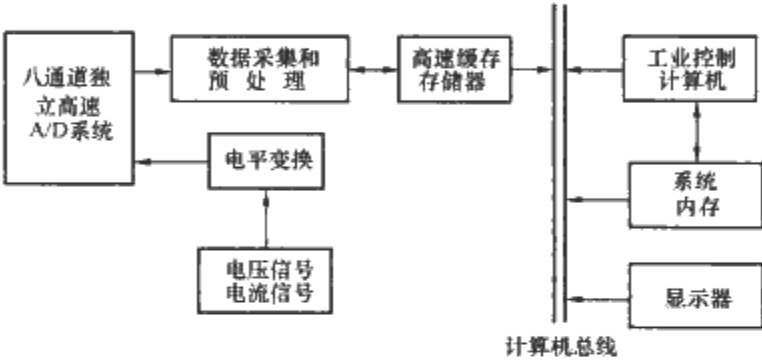


图 5.4-31 交流接触器寿命试验装置数据采集电路

3.3.2.1 软件功能要求

软件系统是交流接触器电寿命试验装置的核心，它控制整个试验过程的进行，并与用户进行信息交互。通过软件界面，用户可以向程序输入试验参数，而程序向用户返回试验进程、试验结果等。

(1) 参数设置菜单。接触器使用类别不同，试验方式也不同，所以有很多参数需要用户输入。可供用户输入的参数有采集参数、试验基本参数、试验运行参数和监测对象。

(2) 查看菜单。为了解试验过程中试品的运行和失效情况，用户可对试验过程中的试验参数、故障记录和试验波形进行查看，从而分析试品的失效原因。

(3) 调试菜单。在试验之前，系统应该有自检功能，即检查电源电压、1/6 电源电压、回路电流等是否与设定相符，相符时才能正式试验。

(4) 试验运行菜单。交流接触器试品在接通和分断时触点电压和电流的波形，对研究触头失效是很有意义的。例如，在试验后期，触头电腐蚀较严重时，会出现较长时间的燃弧，通过电压电流波形可以观察燃弧情况。因此，试品接通和分断时触点两端电压和主回路电流的动态显示是非常重要的。

(5) 失效判断与处理。失效情况分为三种：

- 1) 发闭合指令一定时间后，试品没有闭合。
- 2) 发断开指令一定时间后，试品没有断开。
- 3) 以上两种现象都出现。

在试验进行过程中，程序监视试品触点两端的电压，当试品接通（分断）后，如果触点间电压高于（低于）接通（分断）时的电压门限值，即认为试品失效。一般情况下，触点接通电压门限值设为额定电压的 10%，触点分断电压门限值设为额定电压的 90%、80% 或 70%。出现失效后，

记录失效类型、失效时间及失效次数，蜂鸣器报警，并由操作者选择继续试验、剔除试品或更换试品等处理方法。

(6) 打印菜单。可以打印输出试验参数、动态波形、故障记录、控制时序图等。

3.3.2.2 控制软件设计

控制软件设计时，主要从以下方面进行：

(1) 软件的基本功能。本软件通过对交流接触器进行接通试验、额定接通与分断能力试验、约定操作性能试验、电寿命试验和机械寿命试验，来检测产品的质量水平。

在各个试验过程中，用户可根据具体情况选定一个、两个或者三个试品进行顺序试验。试验开始后，试品将按照设定的操作频率进行动作，在接触器动作过程中，将对每个试品电压、电流进行高速数据采集，并将采集的数据在计算机屏幕上显示。同时，在试品动作过程中，对触头状态进行监测，及时记录并显示故障信息，并对故障试品进行故障处理，当全部试品失效或操作次数达到试验循环次数时结束试验。

(2) 试验控制流程。控制软件采用模块化的设计方式，即每项功能都是通过一些比较独立的模块来完成，这样，不仅便于分别使用和软件调试，而且增强了试验运行的可靠性。软件中有针对操作的提示，具有良好的人机对话界面，可方便试验人员对设备的操作。

1) 运行参数显示与修改模块。试验运行参数是试验的基本设定内容，用户通过参数显示了解试品试验进行的条件。通过试验运行参数设定电寿命试验是进行 AC3 试验还是进行其他类别的试验，也可以设定是进行接通试验还是进行其他试验，以及需要进行试验的次数。

2) 文件处理模块。该模块包括了数据文件的存储、调入，试验数据的显示、打印等。当试品试验完成后，可以通过文件处理模块将试验数据保存到计算机中；也可以通过读取数据文件，将以前的试验数据读入，以使用户了解以前试品的试验情况；还可以通过显示或打印命令，将试验数据显示在计算机上或通过打印机进行输出打印。

3) 试验运行控制模块。该模块是试验的核心，负责控制整个试验的进行以及试验数据的记录。该模块主要根据接通试验、额定接通和分断能力试验、约定操作性能试验、电寿命试验等的控制参数和试验顺序，完成相应的控制。其试验控制程序流程图如图 5.4-32 所示。

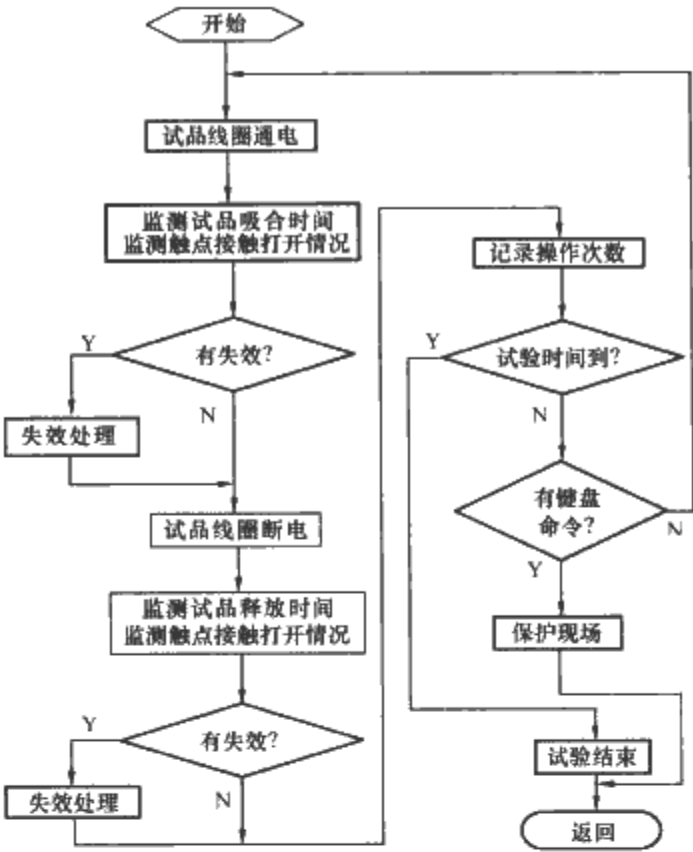


图 5.4-32 交流接触器寿命试验控制程序流程图

3.3.3 试验装置的使用

接触器寿命试验装置的控制软件是由文件、参数设置、查看、调试、试验运行、帮助等菜单组成的，如图 5.4-33 所示。

在软件系统中，文件的打开、保存和另存为及参数设置等信息采用顺序文件进行存储，试验过程中采集处理的大量数据采用二进制文件进行存储。存储的数据信息主要为以后的查看试验参数、故障记录和试验波形等服务。

参数设置菜单有采集参数、试验基本参数、试验运行参数及监测对象等的设置。

通过查看菜单可以对试验参数、故障记录、试验波形进行查看。图 5.4-34 是电寿命试验时的试验参数界面，图 5.4-35 是电寿命试验时的故障记录界面，图 5.4-36 是 AC4 电寿命试验时的试验电压、电流波形。

通过调试菜单对试验装置进行调整和控制，观察各部分是否正常运行。

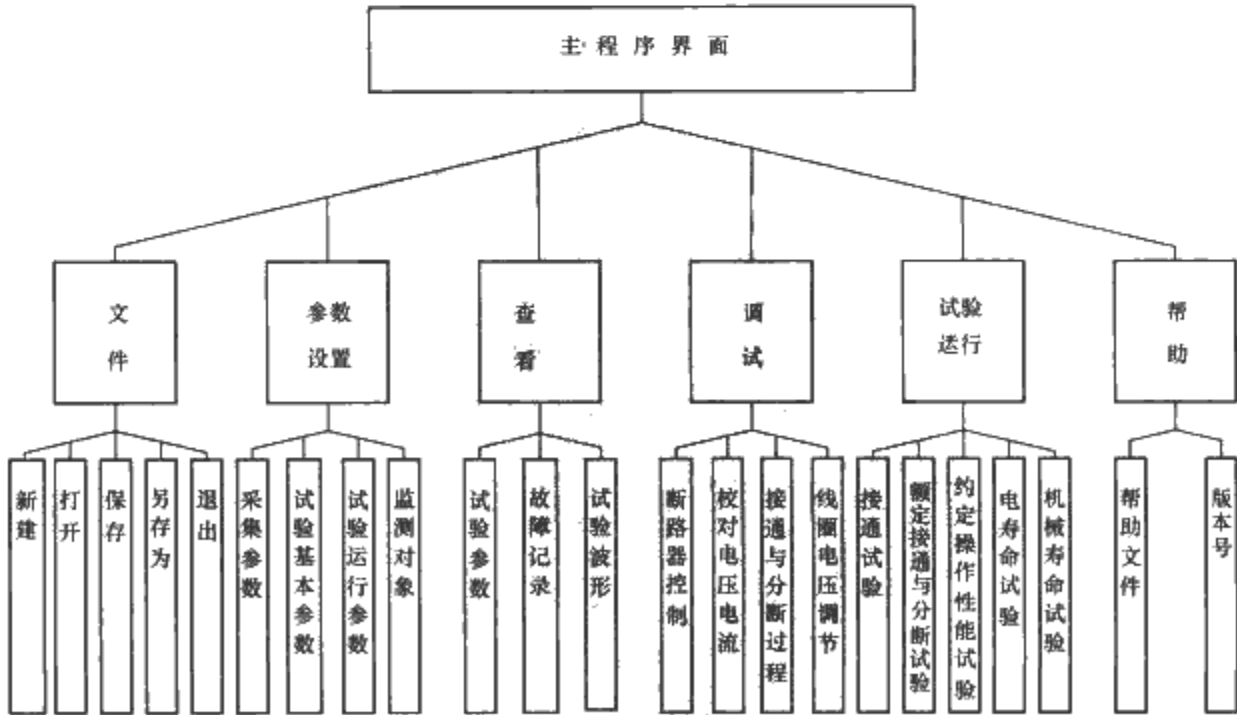


图 5.4-33 交流接触器电寿命试验软件结构框图

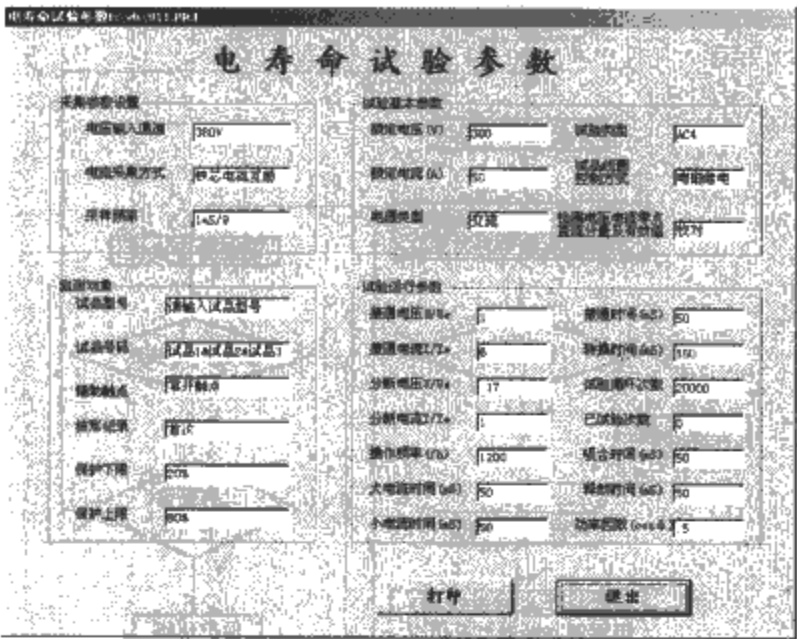


图 5.4-34 电寿命试验参数界面

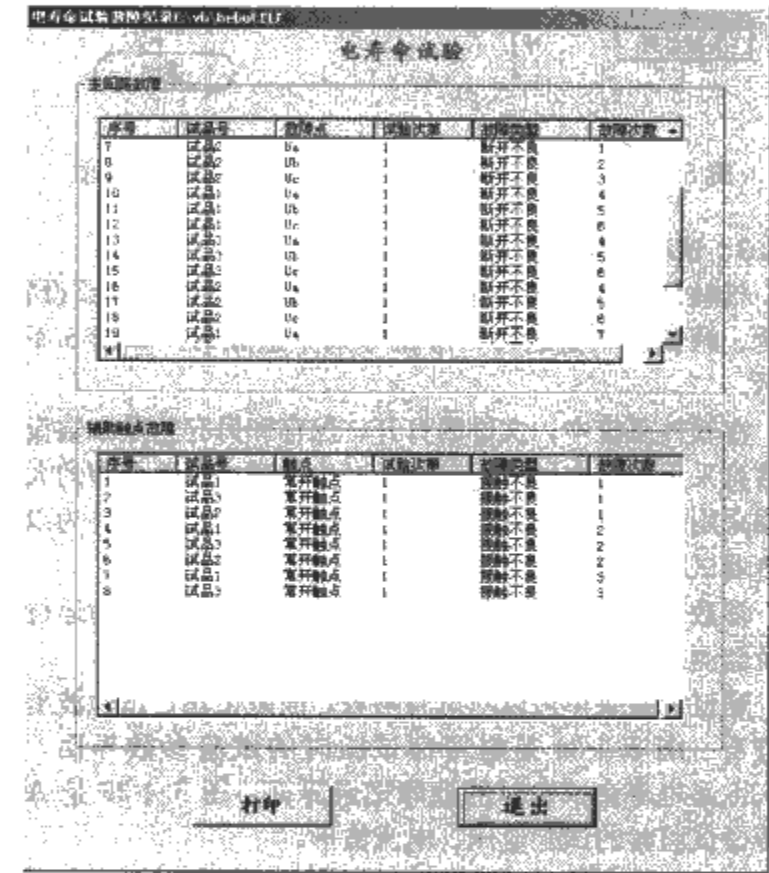


图 5.4-35 电寿命试验故障记录界面

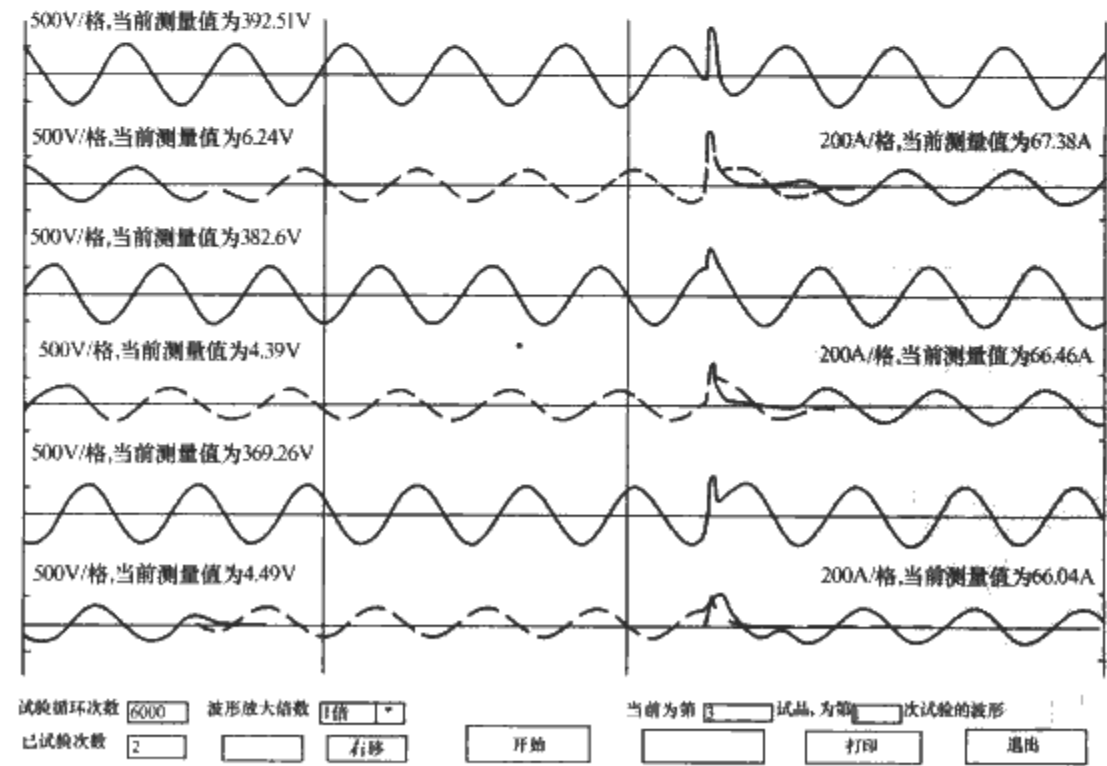


图 5.4-36 AC4 电寿命试验波形

4 剩余动作电流保护器的漏电特性测试技术

4.1 试验设备的技术特点

随着用电设备的增加和普及, 由于电气设备使用不当或线路绝缘损坏造成的电气漏电事故时有发生。漏电事故会引起火灾、用电设备损坏以及用电人员人身触电。为了保证人身安全与用电设备安全, 线路中应安装剩余动作电流保护器。

目前我国剩余动作电流保护器的研制、生产正处在一个向标准化、系列化方向发展的新阶段, 生产技术条件和工艺水平大幅度提高, 质量好、性能稳定、适应性强的剩余动作电流保护器产品越来越多。我国已能生产各类符合国家标准的电磁式和电子式电流动作型的剩余动作电流保护器。全国已推广应用了 3000 多万台电流动作型剩余动作电流保护器。我国生产的剩余动作电流保护器大部分为电子式, 占总产量的 90% 左右。电磁式因制造成本高、价格贵, 使用量较少, 目前仅占 10% 左右。

漏电特性的测试是产品质量的保障, 各生产厂家对漏电特性测试设备提出新的要求, 实现了计算机控制下的漏电特性的测试。漏电特性的测试包括漏电动作电流的测量和动作时间的测量。

4.1.1 机械机构的设计特点

剩余动作电流保护器特性试验过程中, 需要对剩余动作电流保护器的操作手柄进行分闸和合闸操作; 剩余动作电流保护器脱扣后, 再次试验前, 需要对其进行复位, 即按下复位按钮; 检测剩余动作电流保护器的试验装置时, 需要按下试验按钮。整个试验的周期长, 操作次数多, 因而试验设备应对剩余动作电流保护器的操作手柄、复位按钮、试验按钮等手动操作部分实现自动操作。

因为人手施力时有一定的缓冲作用, 为了准确地再现手动操作的条件, 使电器无冲击地操作, 在实现手动电器试验时的自动操作机构设有模拟人手操作的柔性机构。

4.1.2 电路的设计特点

剩余动作电流保护器漏电特性测试电路具备以下特点: (1) 剩余动作电流保护器不同, 额定剩余动作电流及额定剩余不动作电流也不同, 其值可相差上百倍, 通过分挡可以保证漏电电流的检测与控制精度。在剩余动作电流保护器的每极之间, 设计保护电路, 使得试品有且仅有一极有电流。

(2) 根据试验参数, 自动完成对多极剩余动作电流保护器的任一极通以试验电流进行检测。在试验过程中, 剩余动作电流保护器的上口有电源电压, 以保证剩余动作电流保护器的正常工作。为了避免剩余动作电流保护器上口电源相间短路, 设计了相间保护电路, 利用接触器的动断触点与动合触点的配合组成互锁或自锁电路, 即使是多极剩余动作电流保护器, 在同一时刻也只能有一极通试验电流。

(3) 剩余动作电流保护器的机械联动机构, 由电动机正反转带动连杆机构来实现剩余动作电流保护器手柄的拨动。当机械机构到位后, 虽切断电动机电源, 但由于惯性, 机构会转过极点后

反向运动，使剩余动作电流保护器的操作紊乱。例如，闭合剩余动作电流保护器时，由于惯性，机构向下滑动，错误地分断剩余动作电流保护器。为避免这种情况，在机构的上下极点前，设置了机械阻尼器。阻尼器可使机构定位，防止滑动。但由于阻尼器的添加，对电动机的控制提出了更严格的要求，如果机构到位后，电动机的电源不能及时断开，会造成电动机的堵转，易烧毁电动机。因而在试验电路中添加了时间继电器，当机构到位后，向时间继电器发出计时信号，如果控制软件未能及时断开电动机电源，将由时间继电器在整定时间内断开电源，从硬件上实现对电动机的保护。

4.1.3 试验设备的基本性能

计算机控制下的漏电特性测试设备具有如下技术性能：

- (1) 具有可移动操动机构，可对常用型号单极和多极剩余动作电流保护器进行漏电特性试验。
 - (2) 电流输出分为 0~125mA、0~500mA、0~1000mA 多挡输出，试验设备可根据设定的剩余动作电流保护器的试验电流，自动选择合适的电流挡输出。
 - (3) 试验设备具有短路保护功能，工控机意外故障后，由电路进行保护，不会造成相间短路。
 - (4) 在漏电特性试验中，可通过软件选择对多极剩余动作电流保护器的任意一极进行通电检测。
 - (5) 试验设备能自动记录试验次数，试品发生失效时可以对失效试品的编号、失效发生的时间及失效模式进行记录，并整理数据输出。
 - (6) 完整的数据保护功能，意外断电后数据不丢失，电源恢复后不破坏已采集的数据。
 - (7) 试验过程中，若试品发生失效，试验设备可根据输入的控制参数判断试验是否应停止。
- 试验操作过程由工控机显示器提示进行，操作简便。

4.2 硬件设计

4.2.1 试验柜

试验柜有 4 套电动机驱动的机械机构，用来控制试品的分/合闸操作；可同时对单极、两极、三极、四极剩余动作电流保护器进行漏电特性检测。试验柜中的机械机构采用不

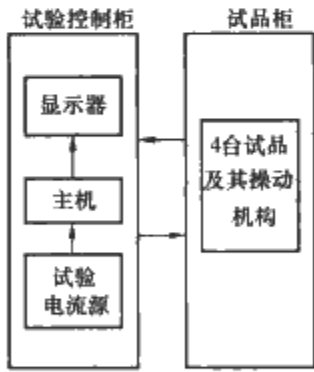


图 5.4-37 剩余动作电流保护器可靠性试验设备框图

锈钢材质，实现防腐防锈。漏电特性检测中，试品可被置于调温调湿箱中模拟环境和长期工作时剩余动作电流保护器的漏电特性。装置可对剩余动作电流保护器提供漏电不动作电流检测剩余动作电流保护器是否会误动。并可进行漏电电流检测，剩余动作电流保护器动作后，装置可自动对其复位。

漏电特性试验设备主要由试验控制柜和试品柜组成。试品在试验时可以放入调温调湿箱中。试验设备的原理框图如图 5.4-37 所示。

试品类型不同，试品柜不同，但试验控制柜是相同的。对外型尺寸不同的剩余动作电流保护器，需更换卡具进行试验。

在试验过程中，由试验设备的电动机构完成剩余动作电流保护器的分合操作。试品的手柄分/合闸机构通过工控机控制电动机的正反转来完成试品手柄的分/合闸操作，并在接收手柄合/分闸到位信号后使电动机停转，因此可由工控

机按照设定的操作频率对试品进行合/分闸操作。

如果计算机软件发生故障，电动机的电源不能及时断开，会造成电动机的堵转，易烧毁电动机。因而在试验电路中设计了保护电路，电动机的控制和保护电路如图 5.4-38 所示。

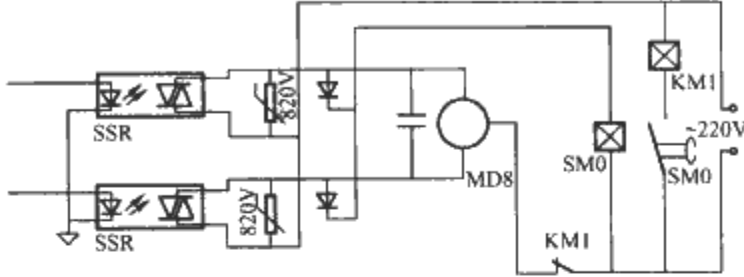


图 5.4-38 电动机控制与保护电路图

4.2.2 漏电电流电路

漏电电流电路由稳压器、降压变压器、电动调压器、检测电路组成。工控机设置漏电动作电流值后，调节电动调压器的控制端，产生正弦交流电流作为漏电电流，用于漏电特性的检测。漏电电流电路框图如图 5.4-39 所示。

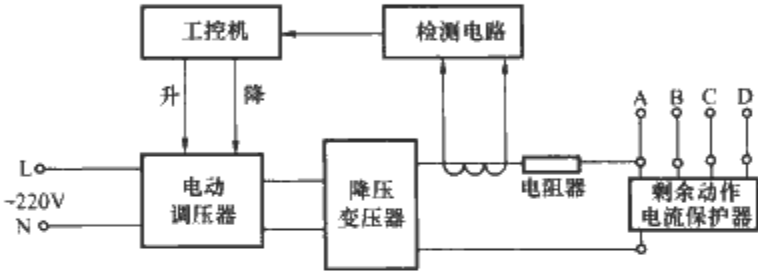


图 5.4-39 漏电电流电路框图

电动调压器的输入为交流 220V，输出为交流 0~250V。电动调压器的输出接降压变压器（220/12V），降压变压器后接电阻。变压器接的电阻有三种，分别用于产生 0~125mA、0~500mA、0~1000mA 的试验电流。

4.3 软件设计

剩余动作电流保护器特性试验应用软件具有良好的人机对话界面。软件采用模块化的设计方式，即每项功能都是通过一些比较独立的函数模块来完成的。软件中有针对操作的提示，可方便试验人员对本设备的操作。

试验软件包括参数显示与修改模块、试品分/合闸控制模块及故障自动判定与记录模块：

- (1) 参数显示与修改模块。试验参数是试验的基本设定内容，用户通过参数显示可以了解试品试验的条件、主要故障判断依据。不同试品可能有不同的试验要求，用户可以通过键盘进行参数修改。
- (2) 试品分/合闸控制模块。在试验过程中，要对试品进行分/合闸操作，要对试品施加额定漏电不动作电流及额定漏电动作电流，还要对剩余动作电流保护器的试验按钮进行操作，且对漏电动作后的试品进行复位。
- (3) 故障自动判定与记录模块。故障自动判定是指在漏电特性试验时可以自动判定试品在试验过程中是否在额定不动作电流下误动作，以及是否在额定动作电流下拒动作。试验装置对以上试验数据可以自动记录，以便试验后进行故障分析。

5 过载继电器的过载特性测试技术

5.1 测试要求

过载特性试验是过载继电器试验的重要内容，其试验包

括 1.05 倍特性测试、1.2 倍特性测试、1.5 倍特性测试、7.2 倍特性测试。过载继电器的过载特性测试的一般要求如下：

- (1) 用户可以通过试验设备的软件进行参数的设定，并可在试验中进行修改。
- (2) 可以进行单台试品试验，也可以对多台试品进行试验。
- (3) 在过载特性测试中，试验设备能自动对试验进行监测，并自动调节试验电流。
- (4) 根据试验要求，能自动完成整个试验，包括 1.05 倍额定电流的特性试验，1.2 倍额定电流的特性试验，1.5 倍额定电流的特性试验，7.2 倍额定电流的特性试验等。
- (5) 可以重复进行特性的测量。
- (6) 自动记录试验结果，并能打印试验数据。
- (7) 提供输出电流接头，方便各种型号产品进行试验。
- (8) 完整的数据保护功能，意外断电后数据不丢失，电源恢复后不破坏已采集的数据。
- (9) 试验过程中，计算机进行操作提示，可以减少误操作，并能随时终止试验。操作简便、人机界面好。

5.2 硬件设计

过载特性试验装置主要由计算机控制试验柜、电流源柜组成。

5.2.1 控制试验柜

5.2.1.1 控制试验柜的构成

工控机控制柜由工控机、输入输出卡、数据采集卡、触头状态测试卡、数字电流表及电源开关等组成。工控机具有抗干扰、安全可靠、高速等特点，由主机、键盘、显示器、打印机等部件组成。其使用方法与普通台式计算机相同。工控机控制柜上方电流表用于指示试验电流大小。指示灯指示电源是否接通。试验的计算机控制框图如图 5.4-40 所示。

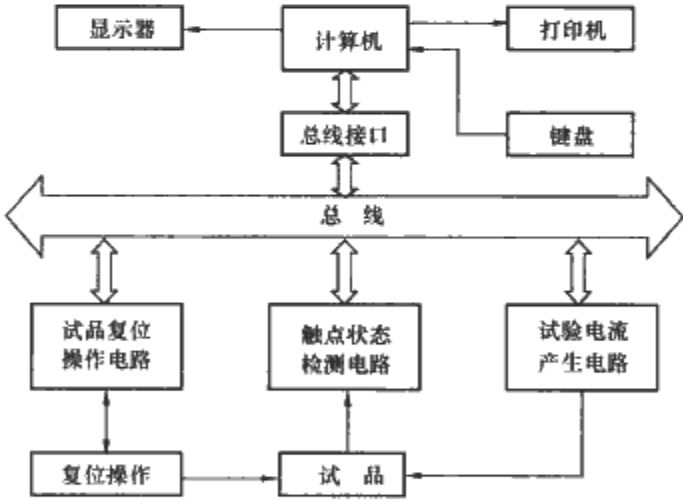


图 5.4-40 过载继电器特性试验的计算机控制框图

5.2.1.2 复位操作电路

复位操作试验过程中，通过工控机控制电动机带动凸轮机构，完成试品复位按钮的操作。电路框图如图 5.4-41 所示。



图 5.4-41 复位操作电路框图

5.2.1.3 触头状态监测电路

触头状态监测电路的主要功能是将被监测试品触头两端电压经衰减后送入 A/D 转换器，计算机从 A/D 转换器读取

触头两端电压，监测电路框图如图 5.4-42 所示。

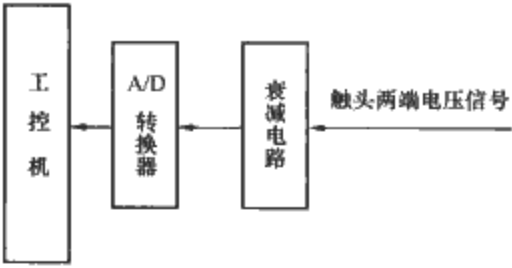


图 5.4-42 触头状态监测电路框图

计算机通过判断闭合触头间的接触压降是否越过标准规定的门限值、断开触头间的电压是否越过标准规定的门限值，来判断试品是否动作，动作后是否复位，实现对过载继电器动作情况的监测。

5.2.2 电流源柜

5.2.2.1 试品的控制与安装

过载继电器的过载特性试验控制电路框图如图 5.4-43 所示。试验控制电路可以同时三台过载继电器进行试验控制。

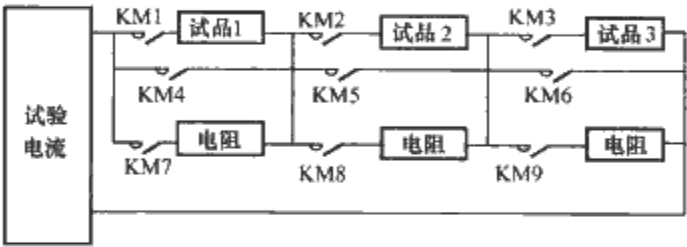


图 5.4-43 过载继电器过载特性试验控制电路框图

在图 5.4-43 中 KM1~KM9 为交流接触器，计算机通过数字输入/输出口驱动固态继电器控制交流接触器的动作，对试品 1、试品 2、试品 3 进行试验。在试验中，某个试品发生故障需要剔除时，也可以通过控制交流接触器的吸合与释放，完成对试品的旁路。KM7~KM9 所在回路为平衡回路，用于试品切除或没有试品时增加回路电阻，其值与试品的内阻相近，便于电流控制和稳定。

5.2.2.2 电流产生与控制电路

电流回路转换与控制回路主要由接触器（或继电器）和固态继电器组成，分别用于 5A 和 1A 电流回路转换、试品回路的控制、平衡回路的选择、短接回路的选择、互感器的选择、电压回路的选择及电源控制。可以进行单台试品的试验，也可以 3 台试品同时进行试验。电流源输出最大电流 0~1500A，输出电压有 5 挡，分别是 0~6V（600A），0~12V（750A），0~30V（50A），0~100V（15A），0~300V（5A）。

电流调节范围为 0~1500A。为了提高控制和检测精度，采用 7 个不同范围的电流检测回路，并配 5 个电流互感器。5 个电流互感器的检测范围分别是 0~1500A，0~500A，0~150A，0~50A 和 0~15A，另外，还有 5A 和 1A 的直通检测回路。保证对所有 160A 以下的过载继电器都可以进行过载保护特性的试验，160A 以上的过载继电器也可进行部分过载保护特性的试验，并保证了控制和检测精度，可以得到准确的试验数据。

在过载继电器特性试验装置中，电流的产生及稳定是保障试验的关键。试验装置采用大电流变压器产生电流，由计算机控制电动调压器实现电流的调节和稳定。试验电流电路框图如图 5.4-44 所示。通过电流互感器产生与试验电流成正比的感应信号，并经信号放大电路放大，将信号输入 A/D 转换卡进行 A/D 转换。计算机根据测量值与设定值进行比

较，并控制电动调压器升与降，从而调节试验电流。电流调节好后，如果电网电压波动或在试验中试品发生变化，计算机根据测量值与设定值出现的变化调节电流，保持电流的稳定。

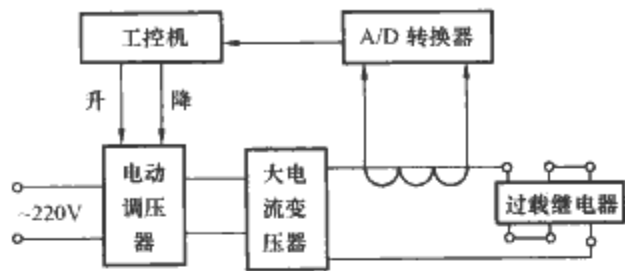


图 5.4-44 过载继电器过载特性试验电流电路框图

5.3 软件设计

过载继电器试验装置是在软件控制下按规定的要求运行的，因此软件是整个装置的控制核心。该软件的主程序是一个键盘扫描程序，在有键输入后，立即判断键代表的命令，无效键输入时，程序返回，并继续判断有无键输入；是有效命令时，执行相应的程序，完成相应的命令。试验运行主程序框图如图 5.4-45 所示。

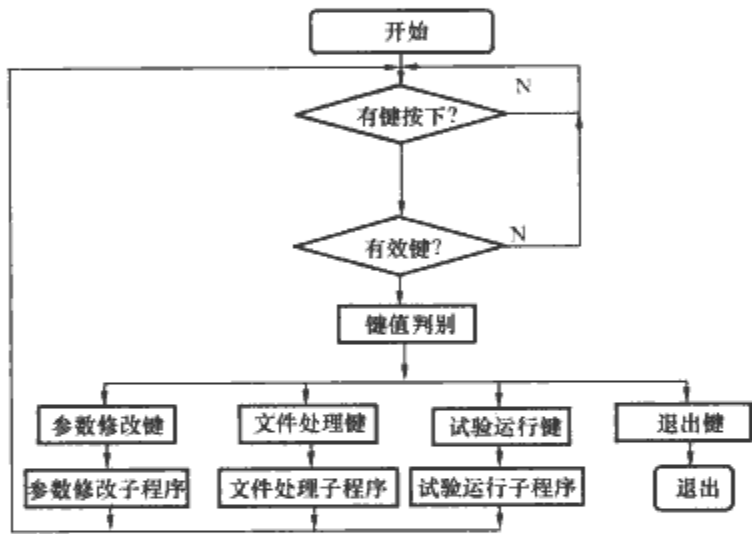


图 5.4-45 过载继电器过载特性试验运行主程序框图

过载继电器试验应用软件由 VB 语言编制。VB 语言作为高级语言，提供了和硬件连接的接口命令，因此既可以实现硬件的直接控制，又可以编制比较复杂的人机界面程序。

控制软件采用模块化的设计方式，即每项功能都是通过一些比较独立的模块来完成的，这样，不仅便于分别使用和软件调试，而且增强了试验运行的可靠性。软件中有针对操作的提示，具有良好的人机对话界面，可方便试验人员对设备的操作。

(1) 运行参数显示与修改模块。试验运行参数是试验的基本设定内容，用户通过参数显示可以了解试品试验的条件，试验运行参数是故障判断的主要依据。不同试品可能有不同的试验要求，用户也可以通过键盘进行参数修改。计算机对修改后的运行参数自动进行保存，在下次运行时计算机自动调入上次运行的参数。主要的运行参数包括 1.05 倍额定电流下的不动作时间，1.2 倍额定电流下的动作时间，1.5 倍额定电流下的动作时间，7.2 倍额定电流下的动作时间范围，试品型号，允许故障次数及试验次数等参数。

(2) 文件处理模块。该模块包括数据文件的存储、调入，试验数据的显示、打印等。当一批试品试验完成后，可以通过文件处理模块将试验数据保存到计算机中；也可以通过读取数据文件，将以前的试验数据读入，以使用户了解以前试品的试验情况；还可以通过显示或打印命令，将试验数据显示在计算机显示器上或通过打印机进行输出打印。

(3) 试验运行控制模块。该模块是试验的核心，整个试验的进行由该模块控制，负责控制试验装置的试验过程以及试验数据的记录。该模块主要完成稳定试验电流、监测动作时间、监测复位时间等功能。

1.2 倍、1.5 倍额定电流下过载保护继电器的特性试验，是从冷态开始加 1.05 倍额定电流至热稳态，然后再通相应的试验电流。在试验中，计算机自动监测过载保护继电器是否动作。在从冷态开始加 1.05 倍额定电流至热稳态过程中试品不动作，最后试验记录是“过载前状态”为“热态”，并在加热时间达到规定时间时，开始进行 1.2 倍、1.5 倍额定电流下过载保护继电器的试验，并在试验过程中记录试品动作情况，如果在规定的时间内试品未动作，试验记录为“拒动作”，表示试品未动作；在从冷态开始加 1.05 倍额定电流至热稳态过程中试品误动作，最后试验记录是“过载前状态”为“动作”，且试验自动退出，不再进行过载试验。

7.2 倍额定电流下过载保护继电器的可靠性试验是从冷态开始的。7.2 倍额定电流下过载保护继电器动作时间为一个时间范围，有上限和下限。在试验过程中，计算机自动监测过载保护继电器是否动作。在试验过程中记录试品动作情况，如果在规定的时间内上限内试品未动作，试验记录为“拒动作”，表示试品未动作；在规定的时间内下限内试品误动作，最后试验记录是“过载前状态”为“误动作”；动作时间大于规定的时间下限，则最后试验记录是“过载前状态”为“冷态”。

在试验过程中，可以随时退出试验，也可以随时跳过试验，进行下一步试验。

第5章 电器试验参数高速采集与处理技术

1 电器试验参数采集与处理技术的发展

电器试验是鉴定电器产品质量的一个重要环节,是改进设计与新产品开发的重要依据,试验的目的就是验证产品性能是否符合标准和技术条件的规定,检验产品在制造上是否存在影响运行的各种缺陷,研究新产品的性能。

从20世纪80年代初至今,计算机测试技术发展非常迅速。国内外学术界对研制新型测试设备十分重视。美国、日本、德国、荷兰等国家的低压电器试验和测试技术水平较高,并生产了许多相应的产品。国内也有不少高速数据采集卡出现,同时为适应低压电器试验参数采集与处理的要求,在电器测试中实现了采集过电压、电流等参数,也具备了测试参数的数据处理功能。

在电器试验参数高速采集与处理系统中,应用计算机、电子测试、数字信号处理(DSP)、人工智能、高速数字化及存储等技术,不仅能自动完成电器试验参数的采集,还能对电器试验获得的参数进行智能分析与处理。有些测试系统具有许多常规试验装置所不具备的优势(例如测试数据可长期保存,记录过电压等高频参数等),更能满足实际应用的要求;可记忆测试次数,判断和记录试品失效的类型和次数以及失效发生的全过程,有利于分析产品的缺陷;可准确显示试品的参数及通断过程的动态曲线,便于了解试品整个动作过程。

2 电器试验的测试技术

2.1 主要内容

测试是具有试验性质的测量,或理解为测量和试验的综合。测量是为了确定被测对象量值而进行的操作过程,而试验则是对未知事物探索性认识的实验过程。测试的目的是把未知的被测信号转化为可观察的信号,并求得所研究对象的有关信息。

测试属于信息科学的范畴,又被称为信息探测工程学。测试技术与信号处理是信息技术三大支柱(测控技术、计算机技术和通信技术)之一。电器试验智能测试技术的主要内容包括测量原理、测量方法、测量系统和数据处理等四个方面。

2.1.1 测量原理

测量原理是指采用什么样的原理(依据什么效应)去测量(感受)被测量,实质上就是传感器的敏感原理。不同性质的被测量用不同的原理去测量,同一性质的被测量也可用不同的原理去测量。

由于电器试验被测量的种类繁多、性质千差万别,因此,测量原理非常广。随着科学技术的进步和发展,可以应用的新原理也会日益增多,要求的知识面也非常广,主要涉及物理学、化学、电子学、热学、流体力学、光学、声学、生物学、材料学等。要确定和选择好传感原理,还需要对被测量的物理化学特性、测量范围、性能要求和外界环境条件有充分了解和全面分析。电器试验智能测试技术主要涉及电器试验的电参数(如触头两端的过电压、电流等)的测量,

测量原理主要涉及电工、信号处理等方面。

2.1.2 测量方法

测量方法是指测量原理确定之后,用什么方法去测量被测量,或者说获得被测量的方式。常用的测量方法有直接测量和间接测量两种。

(1) 直接测量。直接测量即将被测量与同性质的标准量进行比较或与用标准量转换的中间量(或检定合格的仪器)进行比较。实际测量时后者居多,如用温度计测温度,用电压表测电压等。温度计、电压表都是经过与标准量比对(即转换、检定)的。

(2) 间接测量。由于被测量不便于直接测量,而是通过直接测量与被测量有确定函数关系的相关量,然后经过计算得到被测量,称为间接测量。

2.1.3 测量系统

在确定了测量原理和测量方法后,就需要设计、组成测量系统。在设计电器试验测量系统时,主要考虑以下要求:

- (1) 性能稳定。即系统的各个环节具有时间稳定性。
- (2) 精度符合要求。精度主要取决于传感器、信号调节采集器等模拟变换部件。
- (3) 有足够的动态响应。现代测试中,高频信号成分迅速增加,要求系统必须具有足够的动态响应能力。
- (4) 具有实时和事后数据处理能力。能在试验过程中处理数据,便于现场实时观察分析,及时判断试验对象的状态和性能。实时数据处理的目的是确保试验安全、加速试验进程和缩短试验周期。系统还必须有事后处理能力,待试验结束后能对全部数据做完整、详尽的分析。
- (5) 具有开放性和兼容性。主要表现为电器试验设备的标准化,计算机和操作系统具有良好的开放性和兼容性,可以根据需要扩展系统硬件和软件,便于使用和维护。

2.1.4 数据处理

通过电器试验获得的数据是信息的载体,携带着有关被研究物理过程的信息。数据分析通常指分析数据的类别、构成及特征;数据处理指对数据进行滤波变换、识别、估值等加工处理,以便削弱数据中多余无用数值,提取需要的特征值,以便比较全面、准确地获取有用信息。

2.2 试验参数的计算

在电器试验参数系统设备中采用了许多数字信号处理技术,如数字滤波技术、电网频率及试验回路的功率因数计算等。

2.2.1 电网频率的计算

常用的电网频率有50Hz和60Hz。如何通过对电压采集信号的分析,求出电网的频率,是计算机控制的电器试验装置的关键技术之一。傅里叶变换给出了信号的时域与频域的相互转换的方法。这种方法可以分析时域信号的频谱,同样可根据信号的频谱来再现时域信号。

$$H(f) = \text{FT}[h(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (5.5-1)$$

$$h(t) = \text{FT}^{-1}[H(f)] = \int_{-\infty}^{+\infty} H(f)e^{j2\pi ft} df \quad (5.5-2)$$

式中: $h(t)$ 为时域信号; $H(f)$ 为对应的频域信号。

$H(f)$ 通常是一个复函数, 它包含实部和虚部, 即

$$H(f) = \operatorname{Re} H(e^{j\omega}) + j \operatorname{Im} H(e^{j\omega}) \quad (5.5-3)$$

也可以采用幅度和相位表示, 即

$$H(f) = |H(f)| e^{j\phi(f)} \quad (5.5-4)$$

式中: $|H(f)| = \sqrt{[\operatorname{Re} H(e^{j\omega})]^2 + [\operatorname{Im} H(e^{j\omega})]^2}$; $\phi(f) = \arctan \left[\frac{\operatorname{Im} H(e^{j\omega})}{\operatorname{Re} H(e^{j\omega})} \right]$ 。

实际上, 对信号的采样总是在有限的时间里进行, 这个时间区间被称为时间窗。其中有几个特征的时间间隔, 分别是谱的给定分量的周期 $\frac{1}{f_0}$ 、时间窗口的周期 $\frac{1}{f_w}$ 、采样周期 $\frac{1}{f_s}$ 。它们的频域的特征值有谱峰频率 f_0 、谱峰宽度 f_w 、谱的周期重复的间隔 f_s 。

当被观测的信号为初始相角为 0 的正弦信号(单色信号)时, 如果存在 $f_0 = N f_w$ (N 为整数), 则谱的单色性最好。否则将得到形状为 $\sin f/f$ 的谱分布, 这种现象被称为谱泄漏。在实际应用中很难做到观测信号的初始相位为 0 和 N 为整数, 常常会产生谱泄漏的现象。为了最大限度地降低谱泄漏对谱分析的影响, 要求观测时间尽量长。

计算频率的具体方法是: 将电压的采样的 N 个数据放入数组 $x(n)(1)$ 中, 进行 FFT 变换, 结果的实部放在数组 $x(n)(1)$ 中, 虚部放在数组 $x(n)(2)$ 中。找出实部和虚部的绝对值最大的位置所对应的 n , 用下式计算电网频率

$$f_0 = \frac{n f_s}{N} \quad (5.5-5)$$

从式 (5.5-5) 中可以看到, 采样数据的个数 N 决定了电网频率的计算精度。

2.2.2 功率因数的计算

电压与电流的相位差的余弦值被定义为功率因数。因此, 只要通过电压与电流的采样数据, 分别计算出它们的相位, 二者相减后的余弦值即为功率因数。

目前常用的供电电源为 50Hz 或 60Hz 的正弦交流电压。对这种信号进行采样时通常存在初始相位(相角), 表示为

$$h(t) = \sin(2\pi f_0 t + \alpha) \quad (5.5-6)$$

对式 (5.5-6) 进行观测, 如果观测的谱峰宽度 f_w 不满足 $f_0 = M f_w$ (M 为正整数) 关系时, 求初始相角的方法如下:

假设 $t_w = M t_0 + t_\Delta$, $\theta = 2\pi f_0 t_\Delta$, 则

$$\begin{aligned} H(f_0) &= \operatorname{FT}[h(t)] = \int_0^{t_w} \sin(2\pi f_0 t + \alpha) e^{-j2\pi f_0 t} dt \\ &= \int_{-\frac{t_w}{2}}^{\frac{t_w}{2}} \sin\left(2\pi f_0 t + \alpha + \frac{\theta}{2}\right) e^{-j2\pi f_0 t} dt \end{aligned} \quad (5.5-7)$$

设 $\beta = \alpha + \frac{\theta}{2}$, 式 (5.5-7) 变换为

$$\begin{aligned} H(f_0) &= \frac{1}{4\pi f_0} \times \\ &(\sin \theta \sin \beta + (2\pi M + \theta) \sin \beta - j[\sin \theta \cos \beta + (2\pi M + \theta) \cos \beta]) \end{aligned} \quad (5.5-8)$$

因为 $(2\pi M + \theta) \sin \beta \gg \sin \theta \sin \beta$, 且 $(2\pi M + \theta) \cos \beta \gg \sin \theta \cos \beta$, 因此式 (5.5-8) 近似为

$$H(f_0) \approx \frac{2\pi M + \theta}{4\pi f_0} (\sin \beta - j \cos \beta) \quad (5.5-9)$$

初始相位为

$$\alpha \approx -\arctan \frac{\operatorname{Re} H(f_0)}{\operatorname{Im} H(f_0)} - \frac{\theta}{2} \quad (5.5-10)$$

当存在 $f_0 = M f_w$ 的关系时, 则 $t_w = M t_0$, $\theta = 0$, 则

$$H(f_0) = \frac{M}{2f_0} (\sin \alpha - j \cos \alpha) \quad (5.5-11)$$

相角为

$$\alpha = -\arctan \frac{\operatorname{Re} H(f_0)}{\operatorname{Im} H(f_0)} \quad (5.5-12)$$

采用上述方法分别计算出电压和电流的相位, 可以求得功率因数。

3 电器试验参数高速采集与处理系统

3.1 硬件设计

3.1.1 系统的构成及特点

电器触头是完成电路切换功能的关键部件, 是决定低压电器使用寿命的主要因素。除触头本身设计要素起着重要的作用外, 电器触点间弧压变化过程对其触头的分断能力、电寿命以及失效机理起着相当重要的作用。

综合利用计算机技术、数字信号处理 (DSP) 技术和高速接口技术, 研制出有触点电器电寿命、通断能力等试验中的电气参数高速采集与处理系统。系统框图如图 5.5-1 所示。

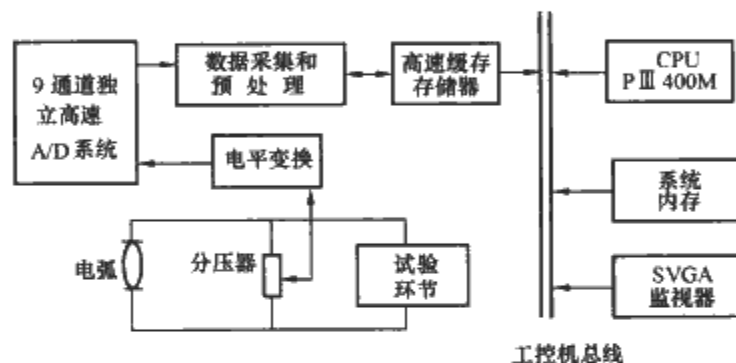


图 5.5-1 电器试验参数高速采集与处理系统框图

系统包括采集参数电平变换部分、高速 A/D 变换部分、高速图像数据缓存和数据处理。软件设计分为数据采集预处理软件、控制软件和波形显示软件。数据处理软件实现电弧电压突变处理、通电时间、燃弧时间、 $I^2 t$ 、 $\cos \varphi$ 的分析运算; 控制软件主要解决 9 通道高速 A/D 数据采集开始和触点切换产生同步触发控制; 波形显示软件可实现波形连续缩放和多种显示方式。该采集系统具有如下特点:

- (1) 由于采用高速 DSP 芯片, 故采样帧频和波形分辨率大大提高, 有 9 个独立的检测通道, 可对 9 个电压、电流信号同时进行检测, 每通道采集频率均可达 1.5MHz。
- (2) 每通道采集频率可变, 其范围为 100kHz~1.5MHz。
- (3) 高速数据缓存空间 512MB。
- (4) 用户界面友好, 便于操作, 使用安全、可靠。
- (5) 具有波形平滑算法, 使波形更平滑、清晰。
- (6) 独有的高速数据缓冲接口技术。
- (7) 研究了电器试验中功率因数、电源频率、 $I^2 t$ 、燃弧时间以及触头两端过电压等主要参数, 具有直接显示的数据处理技术。

在试验过程中电压信号取自被测试品的每组触点两端, 电流信号通过电流互感器或分压电阻取得。被测电量信号的特点如下:

1) 被测信号的幅值变化范围宽, 电压信号 (V) 等级为 24, 36, 48, 110, 220, 380, 440, 660, 1140, 共计 9 级; 电流信号的测量范围为 0.1A~200kA; 互感器或分压电阻的输出为 10mV~5V。

2) 被测信号多, 包括 3 路电流信号、3 路电压信号和 3 路电压标定信号, 共计 9 路。在试验过程中, 电压信号由开

关电器触点两端直接测量或经电压互感器测量，电流信号经过分流器或电流互感器测量，所以 9 路电压和电流信号均需要变换和隔离。

3) 被测信号的频率变化范围大，在被测试品接通和分断的瞬间电压和电流信号的频率很高，大约为 50kHz，并有过电压产生，在正常工作过程中，信号频率为直流或交流 50Hz。

4) 被测试品接通和分断瞬间电流幅值变化大，产生的电磁干扰强。

5) 被测信号为交流和直流两种，采集通道应具有交流和直流信号隔离功能。

3.1.2 信号变换与隔离的设计

由于被测试品的电量信号具有以上特点，所以要求信号变换与隔离电路要满足上述特点要求，应具有如下功能：① 9 路信号变换与隔离电路具有独立隔离功能且线性度高；② 每一通路适合于交、直流信号的变换与隔离，响应频率大于 50kHz，精度等级为 0.2 级；③ 对于不同电压等级的输入信号，变换与隔离电路可以调整变换比例，使输出信号最大幅值为 5V；④ 由于电流信号的变化范围很大，经分流器或互感器取得的电压信号为几 mV~3V，故电流信号变换与隔离电路的放大倍数应可以调整；⑤ 具有良好的抗干扰特性。

信号变换与隔离包括电压信号和电流信号的变换与隔离。

(1) 电压信号的变换与隔离。电压信号包括电压标定信号和试品触头两端的电压信号，由于电压信号等级多，故采用多个电阻分压，由继电器切换取样点，在不同的试验电压下，取样电压值保持为 2V，由于 A/D 采样的幅值为 5V，当被测试品开闭过程中，可以采集到 2.5 倍的过电压，继电器的开闭由软件控制 I/O 卡实现；分压电阻为串联关系。电压隔离是将试品上的电压信号与工控机信号隔开，采用线性光耦 SLC800 隔离，如图 5.5-2 所示。电压隔离电路的性能如下：

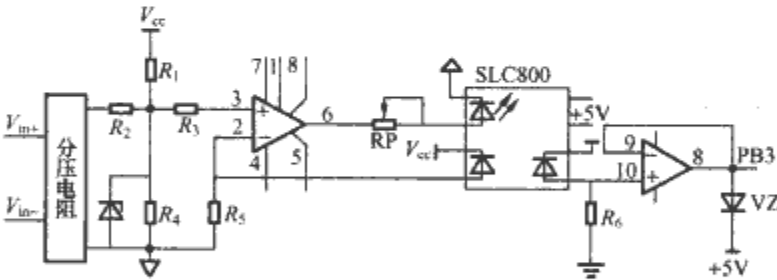


图 5.5-2 电压信号的变换与隔离电路

- 1) 输入电压：24~1140V。
- 2) 输出电压：±5V。
- 3) 隔离电压：2.5kV DC。

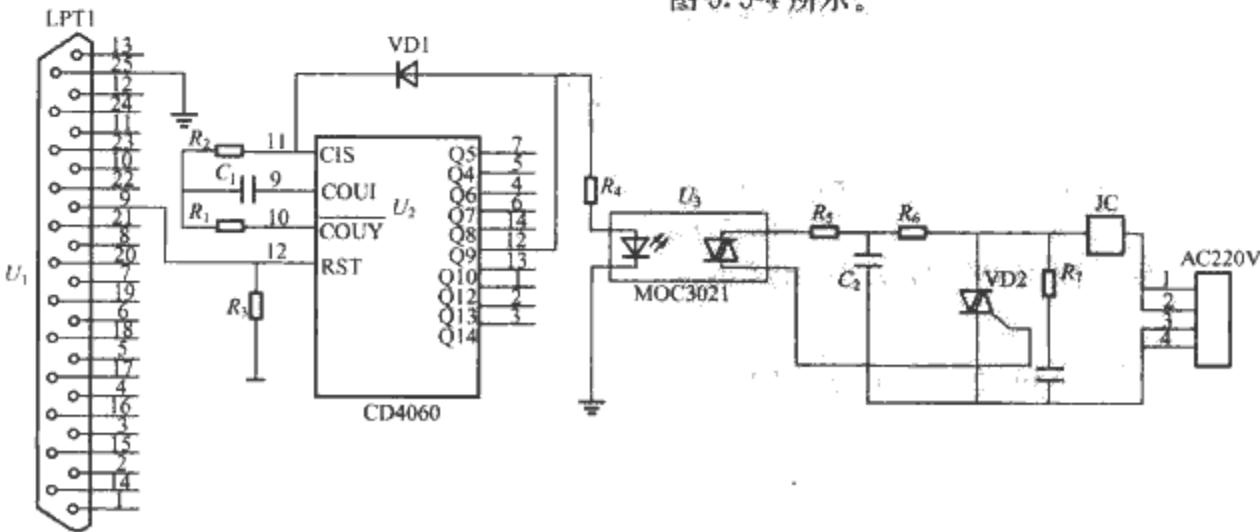


图 5.5-4 主动式同步控制电路原理图

- 4) 精度等级：0.2 级。
- 5) 频率响应：DC~AC 140kHz。
- 6) 响应时间：7μs。
- 7) 输出纹波：<10 mV AC。

(2) 电流信号的变换与隔离。开关电器试验对电流的测量，除了周期分量外，还存在非周期分量。不同容量的产品及试验的种类都很多，电流测量的范围很大，为 0.1A~200kA，要准确地测量分断试验的瞬态电流，传感器是一个重要的测量环节。常用的电流传感器有铁心电流互感器、低感分流器、带气隙的铁心式电流互感器、ROGOWSKI 线圈等。根据电流信号的上述特点，设计了前端多级放大的高共模电压的隔离电路，交、直流共用，共计 3 路。电流信号的放大倍数分为 4 级：1.5, 8, 20, 150；放大倍数的调节由软件控制 I/O 卡实现。电流信号隔离电路与电压信号的隔离部分相似，不再介绍，前端多级放大部分的原理如图 5.5-3 所示。

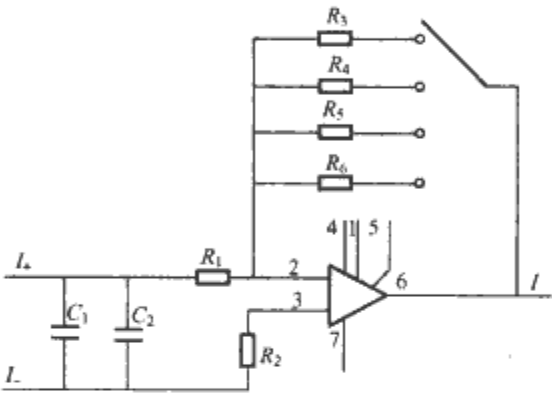


图 5.5-3 电流通道放大器原理图

3.1.3 同步触发电路设计

由于试验间隔时间短且有些试验具有不可重复性，试验信号的同步触发在试验数据采集过程中非常重要。针对现场试验的特点，可以采用 4 种同步触发方式：主动触发、被动触发、电流信号自动触发和电压信号自动触发。主动触发是由计算机发出信号，控制试品的闭合和断开，同时起动 A/D 采集数据；被动触发是试品闭合和断开的同时输入给计算机信号，起动 A/D 采集数据；电流信号自动触发和电压信号自动触发是采用 FIFO 技术。A/D 采集试品的电压或电流信号，当信号幅值大于阈值时，开始记录数据，并将此时刻前的一定时间段的数据进行记录，以保证数据的完整性，此种触发方式不需要试验人员的干预，操作简单，效率高，在现场应用中使用较多。

(1) 主动式同步控制。主动式同步控制，即由计算机执行接口缓冲初始化程序后控制采集卡开始采集的同时，向被测试品发出同步信号，这时电器触头开始切换。这种同步控制适用于电磁线圈或能进行电动操作的电器。其电路原理如图 5.5-4 所示。

在图 5.5-4 中, CD4060 实现 9 级串行分频延时, 其中 R_1 、 C_1 决定了 CD4060 的振荡频率, 并起延时作用。MOC3021 的作用一是为了隔离计算机系统与外部交流电; 二是为了实现双向晶闸管的触发。JC 是被测试品电器的控制线圈。由于 MOC3021 输出直接控制的是感性负载, 电压上升率 du/dt 较大, 有可能超出 MOC3021 工作电压范围。在阻断状态下, 晶闸管的 PN 结相当于一个电容, 如果突然受到正向电压, 充电电流通过门极 PN 结时, 起到触发电流的作用。当电压上升率 du/dt 较大时, 就会造成 MOC3021 的输出晶闸管误导通。因此, 在 MOC3021 的输出回路中加

入 R_6 和 C_2 组成 RC 回路, 降低电压上升率 du/dt , 使 du/dt 在允许范围内。图中 R_7 和 C_3 组成阻容串联保护电路, 防止 du/dt 太高而损坏晶闸管, 保证整个同步控制系统工作稳定、可靠。

(2) 被动式同步控制。被动式同步控制是由手动切换电器触头开始分离时, 发出采集控制的信号, 计算机接收到这一控制信号后, 向采集卡发出开始采集控制的信号, 这时可以保证电器触头开始切换时信号能够被捕捉到。这类控制适用于手动切换电器 (如各种手动开关) 等。其工作原理如图 5.5-5 所示。

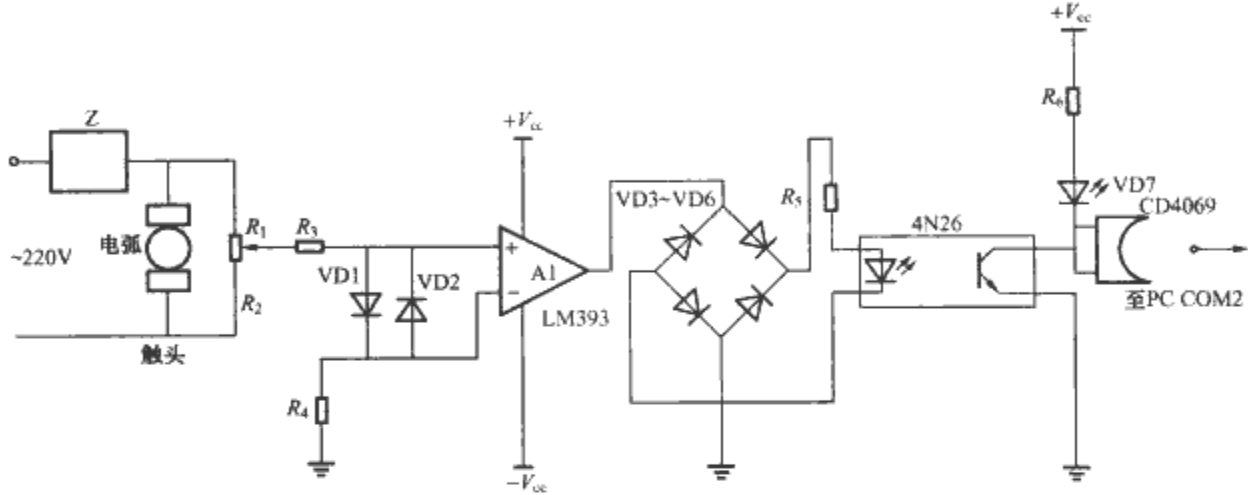


图 5.5-5 被动式同步控制电路原理图

被动式同步控制工作原理是当手动电器触头分断瞬间, 通过在电阻 R_1 、 R_2 分压, R_2 上的电压由过零触发器 LM393 产生正负对称方波, 经全波整流后, 由 4N26 光电隔离, 再经 CD4069 反相为高电位送计算机 COM2 口, 当计算机检测到该引脚为高电平时, 由计算机控制 DSP 开始采集信号。

3.2 软件设计

3.2.1 系统软件的技术特点

采用面向对象程序设计技术, 利用 VC++6.0 程序设计语言实现。用户界面友好, 容易操作, 可扩充性、可维护性好。系统软件结构如图 5.5-6 所示。

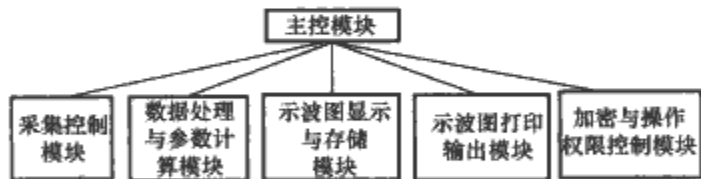


图 5.5-6 系统软件结构

- (1) 采集控制模块。主要实现采样频率、采样长度、采样同步方式、采样信号等级切换等功能。
- (2) 数据处理与参数计算模块。主要实现采样数据中干扰信号处理, 电压电流有效值、峰值、功率因数、信号频率、直流时间常数等电器试验参数的计算。
- (3) 示波图显示与存储模块。主要实现采集信号的不同波形显示方式, 包括放大、缩小, 自由显示、多通道定格显示等方式, 以及采集数据和试验数据的存储。
- (4) 示波图打印输出模块。主要实现试验报告的打印输出, 包括打印表头、合并打印, 输出试验参数选择等功能。
- (5) 加密与操作权限控制模块。加密功能可防止软件盗版, 保护版权。不同操作权限的用户, 对软件的操作受权限控制, 以保护重要参数和数据, 避免出现误操作, 影响系统的稳定性和参数计算的准确性。
- (6) 主控模块。实现各个功能模块的协调、通信, 使整

个系统有序、稳定运行。

3.2.2 系统的界面设计

电器试验参数高速采集与处理系统软件的界面包括文件、采集、延时处理、数据设置、高速波形显示、低速波形显示、参数显示、帮助 8 个菜单项。下面介绍几个主要菜单的功能。

- (1) “文件”菜单。“文件”菜单界面如图 5.5-7 所示。
 - 1) “文件备份”菜单。主要用来当用户采集完数据后, 保存数据。单击“文件备份”菜单, 在其界面上出现让用户输入要保存数据的路径, 输入路径后, 按“OK”按钮, 可以保存数据。
 - 2) “数据读取”菜单。主要用来把备份的数据取回来, 以便绘图用。
 - 3) “退出”菜单。用来退出程序。



图 5.5-7 “文件”菜单界面

- (2) “采集”菜单。此菜单主要用来采集数据和合并数据, 其界面如图 5.5-8 所示。

“1.5M 采集”用来高速采集数据; “100K 采集”用来低速采集数据。“数据处理”用来合并采集后的数据。

- (3) “数据设置”菜单。此菜单用来设置各种参数值, 其界

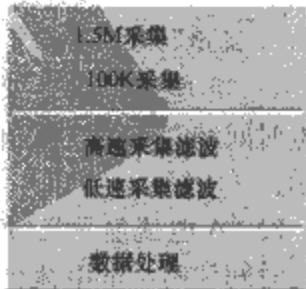


图 5.5-8 “采集”菜单界面

面如图 5.5-9 所示。

(4) “高速波形显示”菜单。此菜单用来显示高速采集的数据的波形，其界面如图 5.5-10 所示。

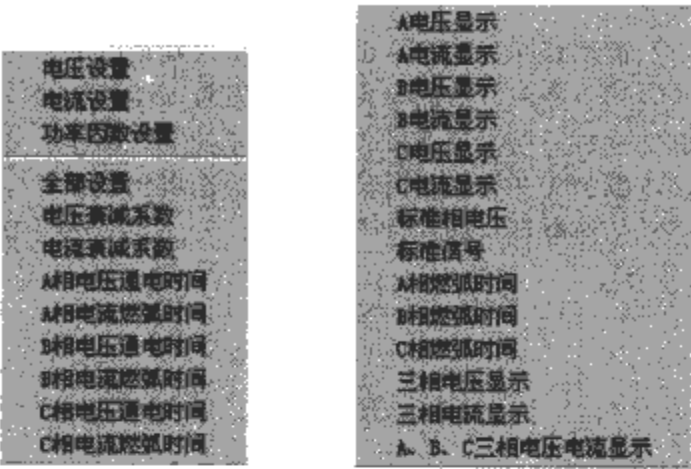


图 5.5-9 “数据设置”菜单界面

图 5.5-10 “高速波形显示”菜单界面

其高速 A 相电压、电流图波形如图 5.5-11 所示。

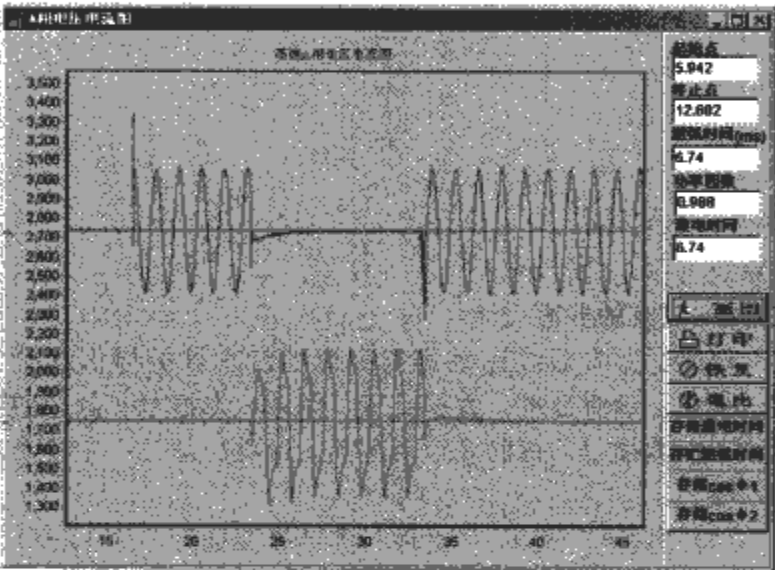


图 5.5-11 高速 A 相电压、电流图

按下“画图”按钮即可画出波形图；按下“打印”按钮即可打印画出的波形图；在图像上按住鼠标不放拉出一个矩形，即可放大图像；按住鼠标右键即可拖动图像移动；按下“恢复”按钮图像即可复原；用鼠标在图像上点按，即可计算出 A 相通电时间和 A 相电压值；按下“存储通电时间”、“存储高电压”、“存储低电压”按钮可把刚才计算的数据存入文件中；注意，当下一次再存入数据时，就会把上一次存的数据覆盖；按下“退出”按钮退出本菜单。

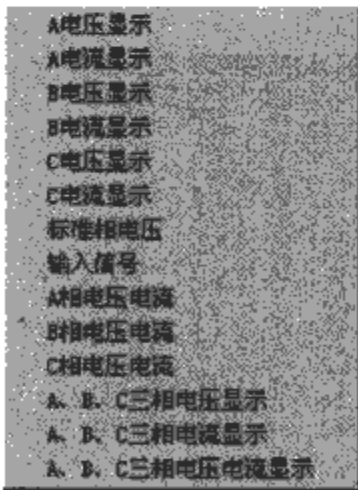


图 5.5-12 “低速波形显示”菜单界面

(5) “低速波形显示”菜单。此菜单用来显示低速采集的数据波形，其界面如图 5.5-12 所示。

1) “A 电压显示”。用来显示低速电压波形，以及计算通电时间和高、低电流值。低速 A 相电压波形如图 5.5-13 所示。

2) “A 电流显示”。用来显示低速电流波形，以及计算通电时间和高、低电流值。低速 A 相电流波形如图 5.5-14 所示。

B 相电压、B 相电流、C 相电压、C 相电流的使用同 A

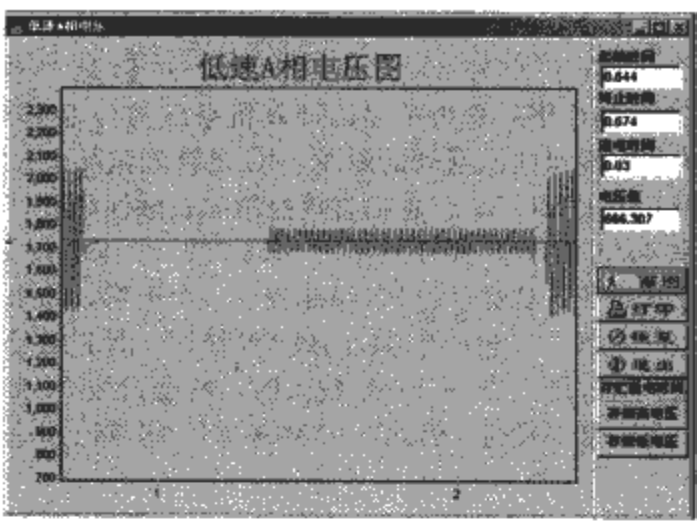


图 5.5-13 低速 A 相电压波形图

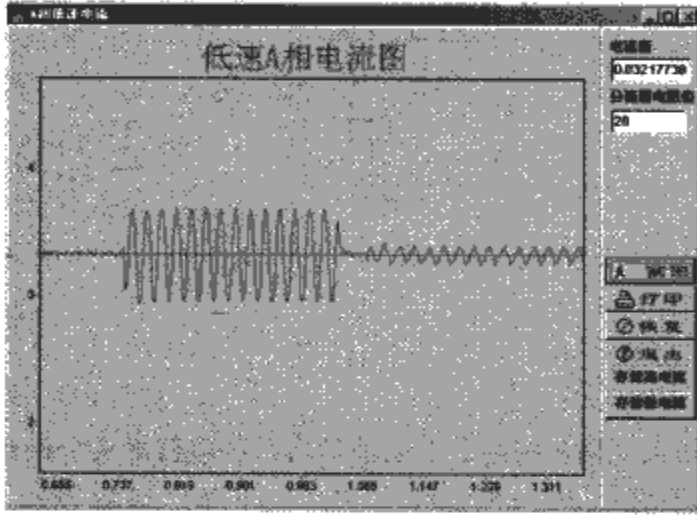


图 5.5-14 低速 A 相电流波形图

相电压、A 相电流一样，不再重复介绍。

3) “A 相电压电流”显示。用来显示低速 A 相电压、电流波形，以及计算通电时间、功率因数和燃弧时间。低速 A 相电压、电流波形如图 5.5-15 所示。

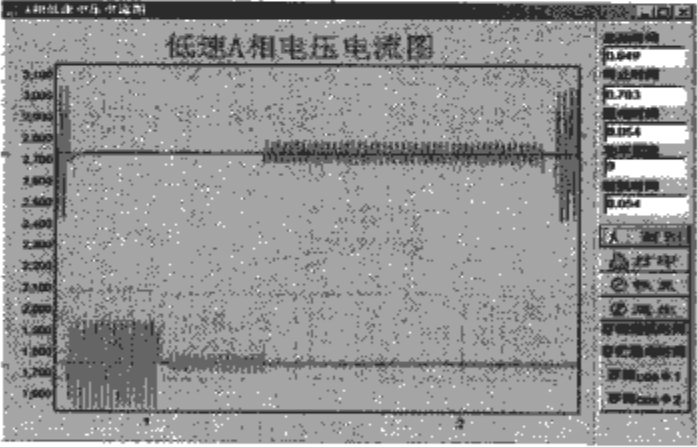


图 5.5-15 低速 A 相电压、电流波形图

4) “A、B、C 三相电压显示”。用来显示三相电压波形，A、B、C 三相电压波形如图 5.5-16 所示。

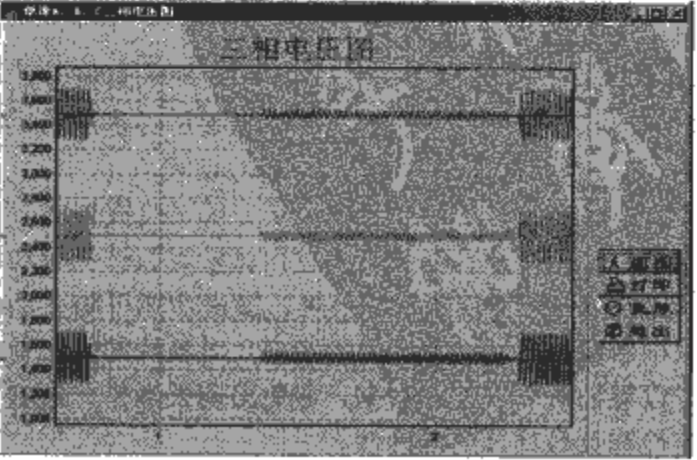


图 5.5-16 A、B、C 三相电压波形图

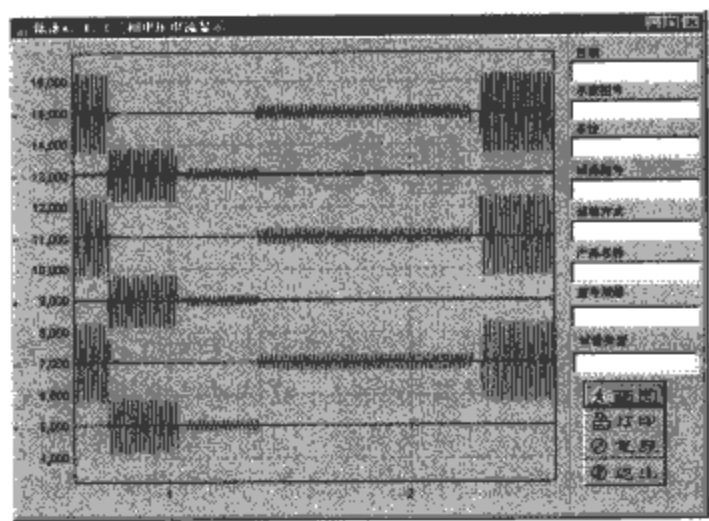


图 5.5-17 A、B、C 三相电压、电流波形图

“A、B、C 三相电流显示”和“A、B、C 三相电压显示”的菜单使用一样。

5) “A、B、C 三相电压电流显示”。用来显示三相电压、电流波形，A、B、C 三相电压、电流波形图如图 5.5-17 所示。

第6章 电器特殊参数的测量技术

1 接触电阻的测量技术

1.1 接触电阻的分析

1.1.1 影响因素

接触电阻的物理本质就是电流通过导电斑点产生收缩效应引起的金属电阻增量(收缩电阻)与表面膜电阻之和。接触电阻值的大小与触点的材料、表面粗糙度、接触形式、表面膜情况、接触力、电流大小及通电时间等有关。另外,接触电阻值的大小还与触点的使用条件,如环境温度、环境湿度、周围介质、空气中悬浮微粒数量及种类、负载种类、触点开路电压、操作频率等有关。因此触点接触电阻是动态变化的,其变化规律复杂。分析其原因,主要有以下几个方面的影响:

(1) 电磨损。电磨损主要包括桥磨损和电弧磨损。对于固定式电接触,不产生电弧,主要考虑微振腐蚀效应;而在可分合式电接触中,则存在桥转移和电弧现象。触点在分断电路的过程中,由于电流的热效应使触点最后接触的一点局部熔化而形成液态金属桥,桥的最高温度点偏离桥中心最终造成桥拉断时材料的转移;在一定的条件下,触点分断电路时将会产生电弧,造成触点净损失。触点的电磨损严重影响电接触的工作可靠性和寿命,电弧的产生必将导致接触电阻的变化。

大量研究和试验证明,电弧对接触电阻有很大的影响。一般断开电触点会产生两种电弧放电,一种是处于金属相的电弧,具有很短的燃弧时间,称为“短弧”;另一种具有较长的燃弧时间,同时包括金属相和气相电弧,称为“长弧”。仅有金属相的电弧对表面影响小,表面保持光滑,接触电阻较低而且稳定。当电弧转入气相区时,表面变得粗糙,接触电阻逐渐升高。

(2) 机械弹跳与动态接触。对于可分合式电接触,其触点的闭合过程由于机械碰撞的存在,触点的接触电阻不是马上就达到稳定的静态接触电阻,而是经历一个弹跳过程和从动态接触电阻到静态接触电阻的过渡过程。由于触点微振动的存在而导致动、静触点间呈现一种变化的动态接触特性。

(3) 导电斑点的微观参数。近代大量的观测结果都表明,接触内表面形成导电斑点的情况十分复杂。导电斑点的形状近乎椭圆且为多个,分布多种多样,它与接触形式、接触压力、接触材料、表面膜性质和环境等复杂因素有关。

(4) 表面膜的干扰效应。大量的观察和研究表明,任何触点材料在空气中,特别是在污染的大气中,在接触表面上都不同程度地生长有表面膜。由于表面膜阻碍导电斑点的形成,或者已经形成的导电斑点又逐渐被表面膜所吞食。如今,表面膜的生长、特性和导电机理已基本清楚,只是如何阻止和破坏表面膜的生长仍需深入研究。

(5) 机械磨损。在没有电流的情况下,触点闭合时的撞击效应使触点产生纯机械性的磨损,这对弱电频繁操作的电器触点来说所造成的影响尤为重要。

(6) 微振腐蚀效应。电接触在工作初期,微振位移使实

际接触面内氧化膜破裂,发生金属直接接触和黏结,金属黏结处受剪切力作用形成磨损颗粒。虽然这些磨损颗粒大多受氧化,但仍能保持良好金属接触,因此初期的接触电阻基本保持不变。当电接触工作时间超过某一临界值时,导电斑点位移表面达到疲劳氧化,表层金属逐渐脱落,因氧化膜生长,磨损颗粒和氧化膜碎片堆积,导致金属接触和导电斑点消失,接触电阻剧增。

1.1.2 一般变化规律

大量的研究表明,从投入使用(或试验)到触点电接触失效,接触电阻值的变化具有一定的连续性,同时也存在很大的随机性。

接触电阻变化的随机性是多种因素综合作用的结果,主要原因有以下三方面:

(1) 由于每次操作动、静触点的接触位置不可能完全一致,所以每次发生电接触时导电斑点的微观参数(如接触斑点的数量、接触形式、接触面积等)会有差异。

(2) 对于含膜触点,由于机械压力和摩擦的作用会使薄膜发生变形和破裂;当电压高于膜的击穿(熔解)电压时,薄膜会被击穿;电弧的侵蚀对膜具有清洁作用,会使膜的厚度和面积发生变化,甚至导电模式发生变化。

(3) 触点表面常会聚集空气中的悬浮微粒,另外,氧化、碳化、硫化等污染物也经常以微粒的形式存在于触点表面,这些微粒一般机械强度高、导电性能差,会恶化触点的导电性能,由于机械力、电磁力、真空吸气作用等影响,这些微粒在触点表面的分布经常会发生变化,由于电弧的侵蚀作用和机械振动还会改变微粒的数量。这些都会影响接触电阻值,使之出现随机波动甚至大幅值的变化。

虽然接触电阻的变化具有一定的随机性,同时也具有一定的连续性。触点表面情况的恶化主要是由于机械磨损、电弧烧蚀、环境效应、微振氧化效应等引起的。这些因素都不可能在短短的几次操作中使触点的表面状况发生巨大改变,所以接触电阻值会在相邻的几次(或几十次)操作内保持一定的相对稳定性、连续性。但可以肯定的是,随着操作次数和使用时间的增加,触点的导电性能会不断恶化,接触电阻值的总体水平会不断增大。随着接触电阻值的增加,接触压降会增加,触点温升也会增加。触点温升的增加又会使触点性能进一步恶化。由于多种因素的综合作用,当触点的导电性能恶化到一定程度时,接触电阻值会急剧变化,会频繁出现幅值很大的变化,或呈现快速增长的趋势,此时触点也就接近失效了。

图 5.6-1~图 5.6-4 是触点接触电阻的典型变化规律,由此可以看出,接触电阻的变化可以分为三个阶段,即初始阶段、平稳阶段和剧变阶段。

1) 初始阶段。触点在使用前,可能会由于暴露在空气中,触点表面生成氧化膜等表面膜,也可能会有些污染颗粒落在触点表面,接触电阻一般比较大。随着触点动作,在机械、电、热的因素影响下,这些表面膜、污染颗粒会被击穿和破坏,使接触电阻变小,在该阶段中,接触电阻略大,波动范围也较大。随着操作次数的增加,接触电阻会变小,

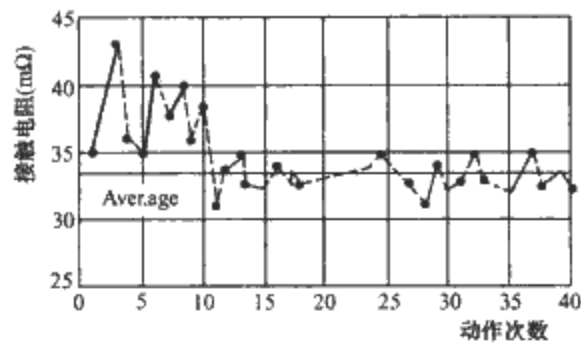


图 5.6-1 清洁银触点接触电阻与动作次数的关系

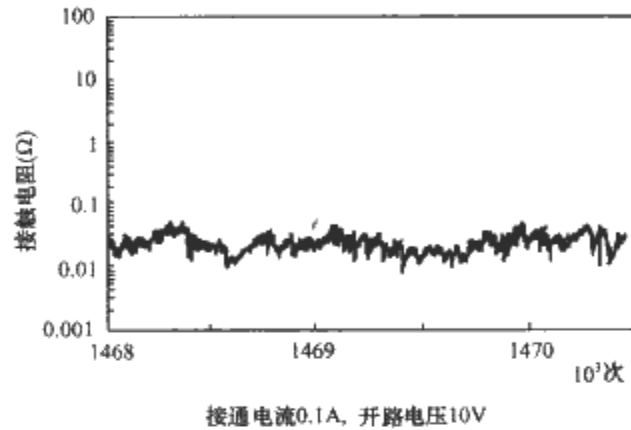


图 5.6-2 Ag/CdO 90/10 静触点的一个具有正态分布的测量段

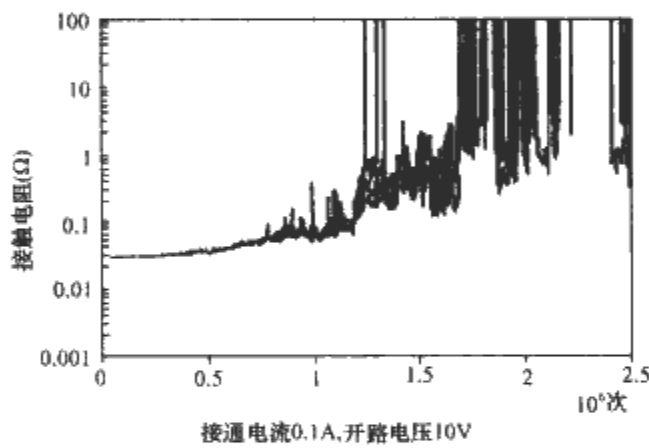


图 5.6-3 镀金的银静触点接触电阻的最小、中间、最大值

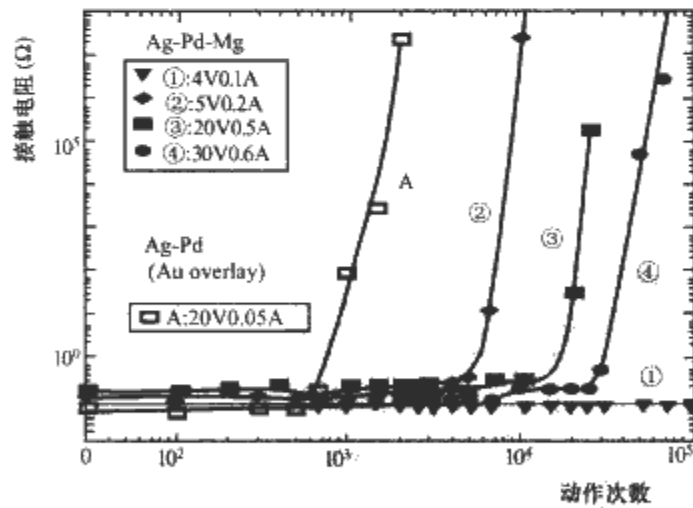


图 5.6-4 Ag-Pd-Mg 合金触点在较宽范围的电条件下接触电阻与动作次数的关系

该阶段一般持续时间较短，操作次数有一二十次，甚至更短。

2) 平稳阶段。随着操作次数的增加，接触电阻逐渐变小，并进入平稳变化阶段。在该阶段，早期在触点表面上的表面膜、污染颗粒等被击穿和破坏，使触点接触状态变好，接触电阻处于稳定阶段。在该阶段，影响接触电阻的条件基本没有变化，接触电阻值是在其平均值上、下作幅度不大的

波动，表现为随机变化。

3) 剧变阶段。随着触点的动作，机械、电、热的因素影响逐渐增大，可能会产生新的表面膜和污染颗粒，也可能因触点磨损使接触面积减少，造成接触电阻变大。污染颗粒的存在使接触电阻表现出很大的随机性。因此，在该阶段，接触电阻值大且不稳定，严重影响电信号的传递。

1.2 测量的一般方法

接触电阻是触点接触工作性能的最基本的参数，接触电阻直接反映继电器触点接触的可靠性。在研究继电器可靠性过程中，一般都要对触点接触电阻进行监测。因此触点接触电阻的测量是继电器可靠性研究中的重要一环，接触电阻的测量有多种方法。工程中，通常采用四端法（其测试条件为开路电压 6V，电流 10mA）来测量实际触点的接触电阻，对于大容量的触点，也有采用 27V×100mA 的方法来测量接触电阻。

继电器动、静触点在闭合状态下工作时，总是加上一定的接触压力使其互相紧密接触，以保证可靠地接通电路、导通电流。但实际上动、静触点这两块接触着的金属的导电性能总要比相同材料、相同尺寸的整块金属的导电性能差。这是因为不管触点表面如何仔细加工、研磨，其表面在微观上总是凹凸不平的。因此当动、静触点相互接触时，触点的实际接触处只是少数几个点，一般称为接触斑点。由于触点表面上存在表面膜，这些接触点也不一定全部导电，只有金属或准金属接触的部分才导电，一般称为导电斑点。当电流流经触点时，只能通过这些导电斑点，因此电流会产生严重的电流线收缩现象，如图 5.6-5 所示。

电流流经触点时发生收缩，产生附加电阻，这个电阻一般称为收缩电阻。此外，触点在大气中，总会有灰尘、水汽、纤维等杂物黏附在触点上形成一层薄膜；触点金属表面与大气中氧、硫等无机气体以及线圈绝缘材料、胶木件、焊剂松香等挥发出来的有机气体产生化学作用而在触点表面形成无机或有机化合物的薄膜。这些薄膜导电性较差，甚至不能导电，因此使接触区的电阻大大增加。由于触点接触表面间的薄膜而增加的电阻称为膜电阻。收缩电阻、膜电阻之和即为触点的接触电阻。

直流电压降法（或称四端法）是国际上最通用的测量接触电阻方法，其电路简图如图 5.6-6 所示。在图 5.6-6 中，电流 I 流过触点时，在触点两端产生一个接触电压降 U_j ；用毫伏表或微伏表将接触压降 U_j 测出，则触点接触电阻 R_j 即可由下式得出

$$R_j = \frac{U_j}{I} \tag{5.6-1}$$

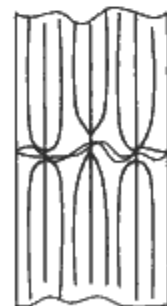


图 5.6-5 电流线收缩示意图

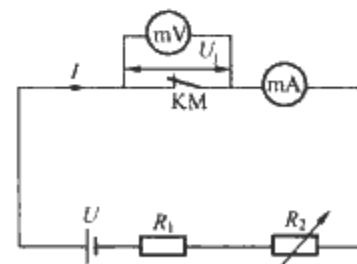


图 5.6-6 四端法测接触电阻电路简图

在测量过程中，为了保持触点的原有接触物理状态不变，应该使通过触点的电流越小越好（对弱电触头测量尤其要注意这点）。但是电流越小，触点两端的电压降也越小，电流和电压能够减小的极限受测量仪表灵敏度和精度的限

制。为了保证在测量接触电阻时接触斑点及其附近不会产生过高的温升，一般规定触点电压不应超过 20mV。工程中，一般在四端法测量接触电阻的电路中，电源开路电压 U 为 6V，触点通过电流为 10mA。对大容量触点，开路电压为 27V，测量电流为 100mA。

在正常情况下，继电器触点的接触电阻 R_j 在 $20\text{m}\Omega$ 左右，触点流过 10mA 电流时，触点两端的电压降 U_j 为 $200\mu\text{V}$ ，由于此电压降数值较小，对测量接触压降 U_j 的仪表要求具有较高的灵敏度，但是灵敏度提高信杂比变小，要想获得较高的测量精度颇为困难。在触点寿命过程中，接触电阻发生变化，而接触电阻的测量误差有时占其变化的比例相当大。为了提高测量精度，同时为了根据接触电阻来研究触点接触可靠性，可以设法提高通过触点的电流 I 的数值。一般认为测量电流提高，接触电阻也升高，触点上的电流—电压呈现非线性关系。理想而洁净的金属表面接触后，触点间的电压降与接触电阻的关系如图 5.6-7 所示。

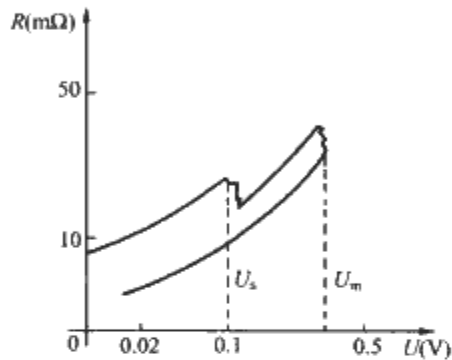


图 5.6-7 洁净的触点电压与接触电阻的关系

当电流增加时，触点间的电压降也随之增大，由接触电阻而产生的焦耳热使初始阶段接触电阻增加。接触电阻与温度间的关系可表示为

$$R_{\theta}=R_0\left(1+\frac{2}{3}\alpha\theta\right) \tag{5.6-2}$$

式中： R_{θ} 为温度为 θ 时的接触电阻； R_0 为温度为 0°C 时的接触电阻； α 为电阻率的温度系数。

若触点电流进一步上升，接触压降达到 U_s 时，接触电阻值下降，这是由于在焦耳热作用下，触点接触面发生软化，使实际接触面积扩大，该 U_s 值称为软化电压，该温度叫做软化温度。如果触点电流进一步增加，则接触电阻再度增大，接触点的温度达到触点金属的熔点时，接触面熔化，接触面积进一步增大，因而接触电阻下降，这时的接触压降 U_m 称为熔化电压。

图 5.6-7 是触点通过一定电流，且触点达到热稳定时的电压—接触电阻关系，如果大电流通过触点，但通电时间很短（如 $<300\mu\text{s}$ ），则接触电阻产生的焦耳热使触点温度升高不多，由式 (5.6-2) 可知，接触电阻值变化不大。另一方面，由于温度上升不多，虽然接触压降可能超过触点材料的软化电压或熔化电压，但触点接触面也不会发生软化或熔化。同时，由于电流值较大，触点上的接触压降也较高，使得测量精度提高，减少了信杂比的影响。这就是用脉冲电流测量接触电阻的基本原理。

1.3 脉冲电流测量接触电阻的装置

1.3.1 硬件设计

该装置的硬件包括三大部分：计算机控制系统、测量控制系统和电源系统。计算机控制系统通过通信控制接口与测量控制系统相连。计算机控制系统主要包括计算机及显示器、打印机、键盘等外部设备，是标准的微机控制系统。测

量控制系统包括电流脉冲宽度设定电路、电流幅值设定电路、逻辑控制电路、A/D 数据接口电路等。电源系统包括电流源和 A/D 转换电路。其原理框图如图 5.6-8 所示。

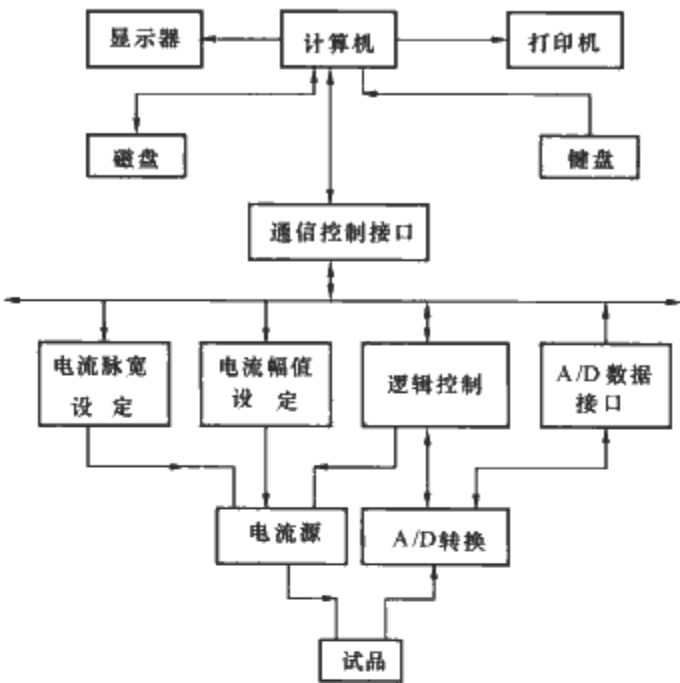


图 5.6-8 脉冲电流测量接触电阻装置原理框图

电流脉冲宽度设定电路控制电流源开启，并控制电流源发出恒定脉冲电流的长短，进而控制脉冲电流的脉冲宽度，它是脉冲电流测量接触电阻装置中的一个关键电路。电流源可以工作在较大的电流下（最大可达 100A），而电流源中的功率器件受发热影响，通过电流的时间不能太长，因此电流源开启时间必须严格控制，以防止超过允许时间而使电流源损坏；另一方面，对于被测量的触点来说，长时间通过大电流，也容易破坏触点表面状态，电流源开启时间也需要严格控制。在脉冲电源设计过程中，脉冲宽度的控制采取了特殊控制电路来限制脉冲宽度，增强了装置的可靠性。如果脉冲源的控制仅用软件来完成定时，定时时间容易受到干扰，产生误差，有时可能引起故障。特别是当人为操作不慎或出现“死机”时，可能造成测试装置的损坏。

这里采用了软件、硬件相结合的脉冲宽度控制电路，如图 5.6-9 所示。

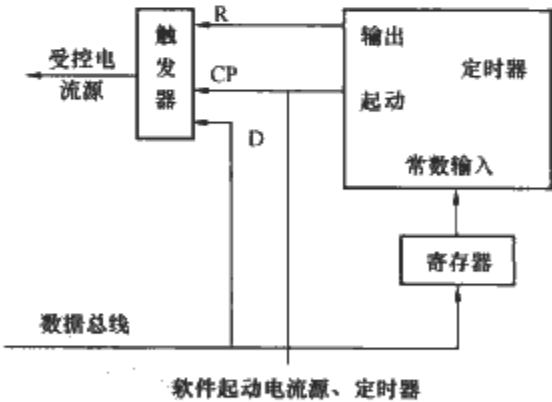


图 5.6-9 脉冲宽度控制电路

脉冲宽度控制字由软件写入寄存器后，便由硬件来完成计时和启闭电流源，进行触点接触电阻的测量。如果在操作过程中计算机复位，则立即关闭电流源，如果出现“死机”现象，则计时电路也将在计时时间到时关闭电流源，保证了测量脉冲电流的宽度。另外在计时电路设计上也限制脉冲宽度。如果软件设置的电流源开启时间过长，此电路也会自动调整使脉冲宽度不超过某一最大值。整个装置的工作过程如下：

首先，通过计算机的键盘把测量脉冲电流所需要的运行参数输入到计算机，计算机接到测量的命令后根据这些参数

立即设定电流的幅值大小、脉冲电流的脉冲宽度等控制字，然后起动电流源，输出脉冲电流经过一个短暂的延时，起动 A/D 转换，将被测的触点压降转换成数字量，脉冲电流时间到时，关闭电流源。此时再通过 A/D 转换的数据接口把 A/D 转换的结果读到计算机内存，同时读入了此次测量量程和是否发生溢出（即触点上的电压降超过 A/D 转换的量程）等信息，至此就完成了一次测量。重复进行上述过程，实现多次测量。对于读入到计算机内存的数据，还需要由软件完成数据的转换、存储和排序等工作。

脉冲电流测量接触电阻装置的主要技术性能如下：

- (1) 脉冲电流幅值为 1~100A 可调，调节步长为 1A。
- (2) 脉冲电流的脉冲宽度不大于 300μs。
- (3) 脉冲电流源最大输出电压为 28V。
- (4) 全部控制命令由键盘输入，有菜单提示，具有人机对话功能。
- (5) 可对触点连续测量，测量电流幅值可以恒定，也可以递增或递减，增量可由程序设定。
- (6) 可测量的接触电阻最小值为 1μΩ。
- (7) 具有永久保存测量数据的功能。
- (8) 可对测量的数据进行统计分析，并可输出相应的图形曲线。

1.3.2 软件设计

测量系统的软件用来控制脉冲电流源的工作，完成各种测量与数据处理工作。该软件包括测量服务程序和数据处理程序。测量系统软件的主程序框图如图 5.6-10 所示。

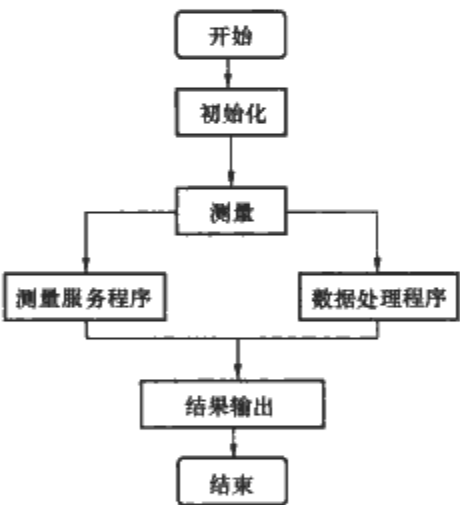


图 5.6-10 测量系统软件的主程序框图

初始化程序在开机后初始化计算机的通信控制口，将全部测量系统置于计算机的控制下，并将受控电流源及其他逻辑硬件初始化。

测量服务程序用来驱动受控电流源、A/D 转换及有关的逻辑控制，完成测量的全过程，并将采集到的数据存到计算机内存。

数据处理程序用来把测量程序采集到的数据进行数理统计和图形绘制输出。通常被处理的数据可达数百个到几十万个。这些数据是按一定的规律存放的，有专门的分类排序表处理程序将其排序、分组，然后运用数理统计的方法可以计算出其数学特征。某些参数（如触点的接触电阻分布等）可以在屏幕上显示或打印输出。数据处理程序所采用的原理大部分是典型的数学方法，这一部分可以只在计算机内存的磁盘之间完成运行，而与测量系统的其他逻辑控制电路无关。

结果输出程序是用于输出测量结果或数据处理结果的，对于测量程序测量到的结果除保存在内存或磁盘上外，还可

以直接以原始数据的方式在屏幕或打印机上输出，以迅速了解本次测量的情况。经数据处理程序处理后的数据结果可用图表及特征方式输出（最大值、最小值、方差等），因而数据的规律简洁直观。接触电阻一般服从正态分布或威布尔分布，许多学者都采用威布尔分布描述接触电阻，并且指出用接触电阻的平均值、方差、最大值均不能正确反映触点的接触状态，而应采用在一定置信度下的接触电阻值来表示。可以由数据处理程序对所测接触电阻数据作上述处理。

1.3.3 脉冲电流法与常规法的比较

脉冲电流测量接触电阻装置研制后，通过标准化仪表（标准电阻、标准电压源、记忆示波器）对脉冲波形、测量电压进行了校验，并用标准电阻和标准电压源间接对脉冲电流值进行了校验，保证了该装置的测量精度。用常规法测量接触电阻时，其值有一定的随机误差（由干扰信号引起的），而用脉冲电流测量时，由于电流值较大，触点上的电压降也较大，因此减少了干扰误差的影响。常规法与脉冲电流法对继电器触点的测试结果对比见表 5.6-1。

表 5.6-1 常规法与脉冲电流法对继电器触点的测试结果对比

接触电阻 (mΩ)	触点号					
	1	2	3	4	5	6
常规法	9.2	9.4	8.2	8.4	7.4	9.4
脉冲电流法 (1A)	8.5	8.7	8.4	7.8	8.0	9.6
脉冲电流法 (10A)	8.3	8.6	8.2	7.6	7.8	9.2

注 两种测量方法的结果具有一致性，但用常规方法测量时，干扰信号较大，影响测量精度，需要多次测量取平均值。

从表 5.6-1 中可以看出，用脉冲电流法和常规法（10mA×6V）测量新继电器触点的接触电阻时，两种方法所测得的结果比较接近，说明了装置的准确性。对于不是新的继电器触点，脉冲电流法具有常规法所不具有的独特性，这也是脉冲电流测量接触电阻装置的更大用途。

1.4 脉冲电流测量技术的应用

采用脉冲电流法，对试验中的继电器触点接触电阻进行测量，由测量结果发现，接触电阻值的变化与触点表面状态有关。根据试验及分析结果，可以将触点分为三类：洁净触点、有膜触点和有污染颗粒的触点。不同种类触点接触电阻变化规律不同，而同种类触点接触电阻变化规律相同。

1.4.1 洁净触点接触电阻变化规律

对继电器触点（Ag-Mg-Ni 镀金）进行接触电阻测量，发现有相当多的触点接触电阻在不同测量电流下不变，测量结果与测量顺序无关。接触电阻典型值见表 5.6-2。

表 5.6-2 洁净触点（Ag-Mg-Ni 镀金）在不同测量电流下的接触电阻

测量电流	100mA	1A	10A
接触电阻 (mΩ)	8.2	8.4	8.2

注 100mA 是采用直流四端法测量时的电流，其余测量电流为脉冲电流。

从表 5.6-2 中可以看出，该类触点在不同测量电流下，接触电阻非常接近。通过对该类触点在光学显微镜下进行大量微观观察，发现这类触点具有共同性质，触点表面上只有机械接触的痕迹，而没有污染颗粒或表面膜，我们称这类触点为洁净触点，如图 5.6-11、图 5.6-12 所示。

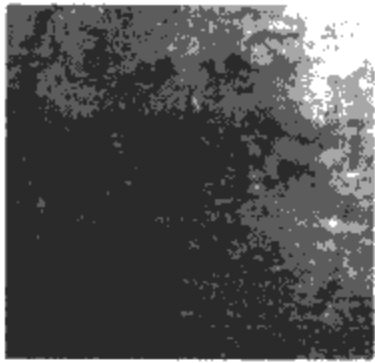


图 5.6-11 洁净触点动点接触痕迹

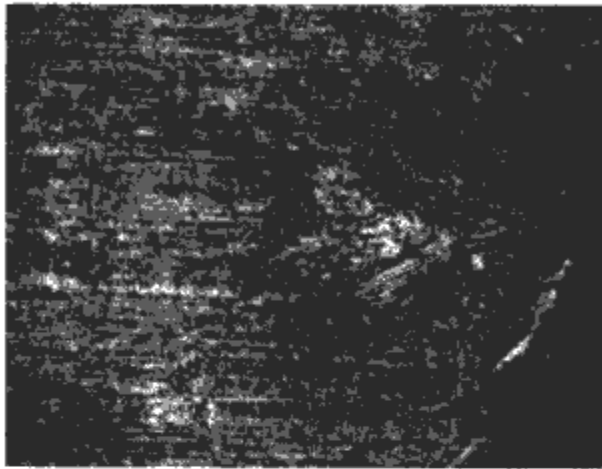


图 5.6-12 洁净触点静点接触痕迹

脉冲测量电流对该类触点接触电阻无影响，其原因是：对于洁净触点来说，触点表面是金属接触，接触斑点为导电斑点，当电流流过触点斑点时，电流收缩产生收缩电阻，在这种情况下，收缩电阻是接触电阻的主要部分。影响收缩电阻值的因素是接触斑点的大小、数目、形状、分布和触点温度，虽然测量接触电阻的电流可达到 100A，但由于脉冲电流的时间只有 300 μ s，因此触点温升很低，触点不会软化，接触斑点不发生变化，收缩电阻也不会改变，所以在不同脉冲测量电流下接触电阻值基本保持不变。另一方面，提高测量电流后，触点电压降增大，从而减少了测量误差，测量精度也得到提高。用常规方法测量时，一般要多次测量并取平均值，而脉冲电流法既可提高测量速度，也可减少测量误差，测量值稳定。

1.4.2 含有污染颗粒的触点接触电阻变化规律

采用常规电流和脉冲电流对经过高温中等电流筛选的继电器触点（Ag-Mg-Ni 镀金）测量接触电阻，发现这时的触点中有相当一部分触点接触电阻的典型值见表 5.6-3。

表 5.6-3 含污染颗粒触点（Ag-Mg-Ni 镀金）
在不同测量电流下的接触电阻

测量电流	100mA	1A	5A	10A	20A
接触电阻（m Ω ）	22.7	26.0	24.0	13.2	11.7
20A 后的测量电流	1A	5A	10A	20A	
接触电阻（m Ω ）	11.2	11.9	11.7	11.6	

注 100mA 是采用直流四端法测量时的电流，其余测量电流为脉冲电流。

我们发现，在脉冲测量电流下，脉冲电流幅值上升，接触电阻值下降。触点经 20A 脉冲电流测量后，再用小电流测量接触电阻，触点接触电阻值保持在较低值水平上。继电器动作减少几次（一般不超过 5 次）后，再用小电流测量，则接触电阻又恢复到原来值，其变化规律见表 5.6-3，即这类触点的接触电阻变化规律具有重复性。采用 X-650 电子扫描电镜对触点进行观察，该类触点的典型表面形貌如图

5.6-13 所示，图 5.6-14 是触点局部放大的形貌图。

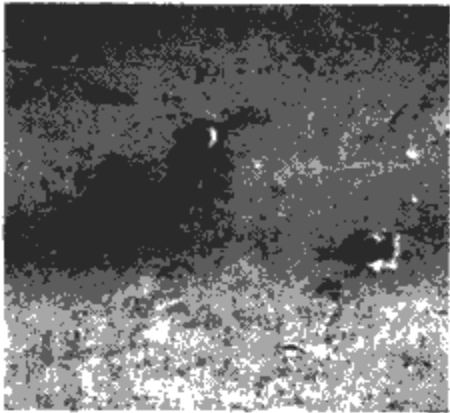


图 5.6-13 含污染颗粒的触点表面形貌

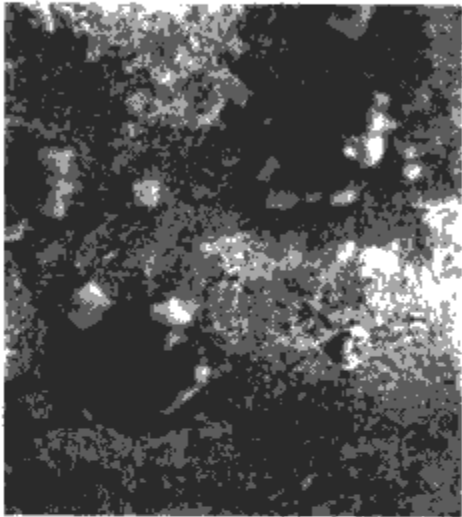


图 5.6-14 局部放大形貌

从图中可以看到，触点表面有材料转移形成的凹坑，这个凹坑即是接触斑点。在凹坑内存在着松散颗粒，即接触斑点上有污染颗粒存在。触点接触微观状态不同，接触特性不同，机理十分复杂。由于这类触点表面有碳及碳化物等污染颗粒，当脉冲测量电流流过触点时，在导电斑点处发生收缩，并使污染颗粒带上电荷。在收缩电流产生的电磁场中，污染颗粒受到电磁力驱动。当脉冲测量电流较小时，污染粒子所受电磁力也较小，故只有较少（甚至没有）污染颗粒在小电流作用下移离接触斑点，这时接触电阻较大；当脉冲测量电流增大时，污染颗粒所受电磁力变大，污染颗粒在大电流作用下移走的较多，使导电斑点面积增大，所以接触电阻值下降。因此用小脉冲电流测量该类触点接触电阻时，接触电阻值较大，而脉冲测量电流增大时，接触电阻值减小。对于经过大脉冲电流测量接触电阻后的触点，再用小电流测量接触电阻时，由于触点接触状态没变，接触电阻值要比刚开始测量时小。另一方面，污染颗粒在脉冲电流下只是被移离接触斑点（微观上），而不会被溶解或烧毁。若触点动作若干次后，污染颗粒重新分布在触点上，再用小电流测量触点接触电阻，接触电阻值又将上升。即对于这类触点来说，触点接触电阻随脉冲测量电流增大而变小，并在触点动作前接触电阻一直保持为较小值，当触点动作几次后，污染颗粒重新分布在触点上，接触电阻显著上升，接触电阻又随测量电流的增大而减小。

触点表面上存在污染颗粒时，触点的接触电阻在触点动作过程中表现出随机性，可能造成触点偶然接触失效。若用常规电流测量这类接触电阻时，其随机误差较大，也无法检测出是否有污染颗粒。用脉冲电流测量时，可以根据接触电阻变化规律，判断出触点上是否有污染颗粒，并根据接触电阻值变化的大小判定触点污染程度，从而确定

触点可靠性。

1.4.3 含膜触点接触电阻变化规律

某继电器经过一定电寿命试验后，其触点（Ag-Cu 合

金）在不同脉冲电流下，所测得的触点接触电阻典型值见表 5.6-4，接触电阻与测量电流的关系曲线如图 5.6-15 所示，该触点表面形貌如图 5.6-16 所示。

表 5.6-4 含膜触点（Ag-Cu 合金）在不同脉冲电流下的接触电阻

脉冲电流 (A)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
接触电阻 (mΩ)	61.7	51.3	41.5	36.6	31.2	28.1	25.5	24.0	21.0	16.2
脉冲电流 (A)	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
接触电阻 (mΩ)	11.6	9.9	9.2	8.8	8.6	8.6	8.6	9.3	9.0	

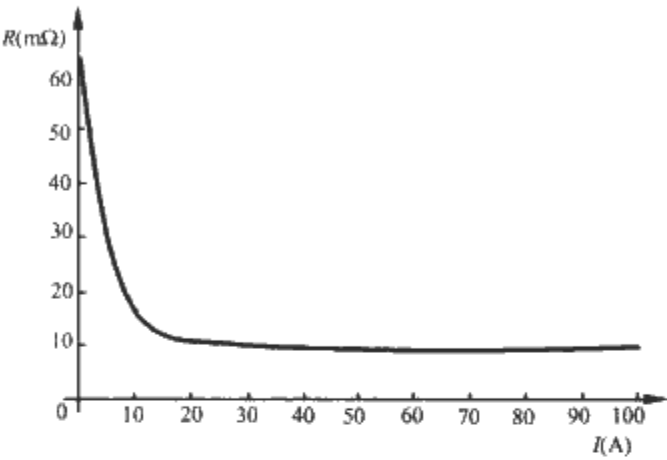


图 5.6-15 含膜触点的接触电阻与测量电流的关系

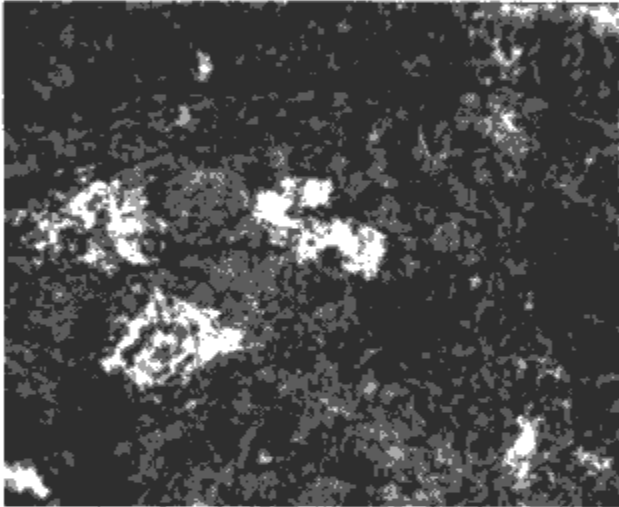


图 5.6-16 含氧化膜触点表面形貌

在图 5.6-16 中有发亮点，这是导电斑点，上面没有覆盖氧化膜，而在其周围有致密的氧化膜。

在触点导电斑点（或部分斑点）上有氧化膜时，用小脉冲电流测量接触电阻，触点上的表面膜没有（或有很少部分）被击穿（或称熔解），接触电阻值较大。随着脉冲电流的增加，膜被熔解的越来越多，因此导电斑点不断增加，接触电阻随之下降，当电流达 20A 时，膜基本被熔解。膜的熔解是一个不可逆过程，在触点表面上再次形成氧化膜需要一定时间，因此当用大脉冲电流测量这类触点接触电阻后，其导电斑点增大，再用小电流测量接触电阻时，接触电阻值将保持在低值水平上，即使触点动作几次后，由于导电斑点形成金属接触，又没有污染颗粒存在，且触点动作并不改变此时的触点接触状态，因此接触电阻仍保持在较低值水平上。用常规方法测量时，只是测得的接触电阻值较高，而不能确定触点表面上是否有表面膜，而采用脉冲电流法测量时，可以根据接触电阻的变化规律判定触点上是否有氧化膜。

1.4.4 结果分析

触点表面有污染颗粒时与有致密表面膜时，在矩形脉冲电流下触点接触电阻的变化规律是不一样的。在脉冲测量电流下，这两类触点的接触电阻随测量电流的增大而减小，触

点动作几次后，接触电阻基本保持不变的是表面上有氧化膜的触点，而接触电阻又变大的是表面上有污染颗粒的触点。通过理论分析可以解释触点接触电阻在脉冲电流下的变化规律，并与试验结果及微观观察相一致。因此可以得出结论：用脉冲电流法测量接触电阻可以区分触点是否洁净，触点表面上是否有污染颗粒，是否有氧化膜等表面膜情况；在不同脉冲电流下，接触电阻值变化越大，说明触点表面污染也越严重，其可靠性越低。根据这一结论，可以在继电器可靠性研究与试验中，用来预测触点接触可靠性。用常规法测量接触电阻，只有在接触电阻很大，即超过规定值时，才能作出触点接触电阻异常的判断；而在触点接触电阻较低，但触点表面上可能有污染颗粒或表面膜，触点特性逐渐变坏，即将失效时，用常规测量接触电阻的方法是无法作出判断的。

2 电器电弧动态拍摄技术

2.1 电器电弧拍摄的一般方法

开关电器是一类重要的电器，它的基本功能是在所要求的短时间内对电路进行通断，也就是在具有一定电位的电路中进行导体与绝缘体的迅速变换，即起开关作用。目前，绝大多数低压开关设备都是机械式有触点开关，机械式开关设备是用触头来分断电路中电流的。在大气中开断电路时，只要电压超过 12~20V，被开断电流超过 0.25~1A，在触头间隙就会产生电弧。

低压电器触头上电弧对触头的电磨损，严重地缩短了电器的电寿命。灭弧室的设计好坏又直接影响灭弧性能。所以对电弧运动过程的实时、动态测试研究不仅能改进灭弧室的设计，更重要的是能够很好地分析研究电弧进入灭弧室所受的电力、热动力、气体阻力和绝缘栅阻力的综合作用，从而改进电器结构，并使其性能大幅度提高。

传统的电弧研究方法有探针法、电磁法和光谱法等，通过这些方法测试电弧的运动过程，可以获得电弧的物理特征参数。但要研究电弧运动过程全貌就必须拍摄电弧从燃弧到熄弧的全过程。

随着计算机技术和软件技术的进步，计算机辅助设计与数值仿真技术在各领域中得到广泛应用。在低压电器的开关电弧研究中，采用计算机技术，可以对灭弧室进行数值仿真，深入地研究电器的整个开断过程中极其复杂的电、热、磁、机械等一系列现象。借助计算机，将理论分析、试验研究和计算机仿真有机结合起来，使产品设计更加科学，可以大大减少设计周期，减少试验的盲目性和费用，有利于提高电器产品的技术性能。

对电弧形态的观测，一般采用多镜头快速摄影器、高速摄影机、电快门的高速摄影装置、变像管摄影机等。胶片要经过曝光、冲洗、成像等程序，操作周期长，每一程序都影响图像的精度，难以定量分析。同时还存在着拍摄费用高，

拍摄速度慢的缺点。随着电子计算机、高速 A/D 及存储电路技术的飞速发展,使得以光电二极管阵列及电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 为图像传感器的高速摄像技术取代机械高速摄影成为可能。

2.2 电器电弧动态拍摄方法

2.2.1 采用高速摄影机进行电弧拍摄

在焊接领域内,有用普通相机进行电弧拍摄的,由于焊接电弧持续时间较长,拍摄比较容易。在开关电弧拍摄中,必须有同步控制技术,否则会浪费大量的胶卷,甚至不能拍摄到电弧。要拍摄到连续的开关电弧,研究电弧的变化过程,必须采用计算机技术和高速数据采集技术。

低压电器的灭弧室一般由器壁形成一个小室,电弧开断过程在灭弧室内进行,并且时间很短,很难用肉眼进行观察。近年来,随着光电技术的发展和计算机技术的提高,使用仪器观察低压电器开断过程成为可能。图 5.6-17 是采用数字式高速摄像机对断路器灭弧室内电弧的开断过程进行观察的一个电弧拍摄示意图。

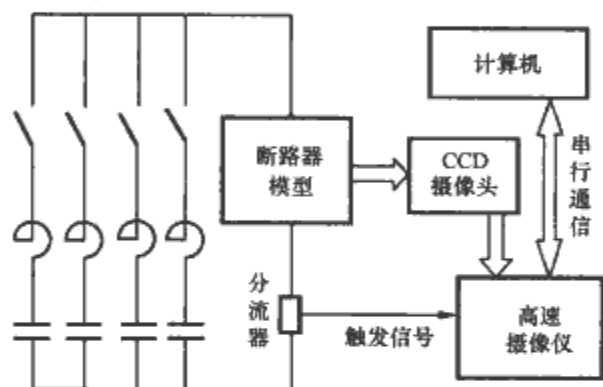


图 5.6-17 高速摄像机拍摄电弧的示意图

图 5.6-17 中,断路器的短路电流由 LC 单频振荡回路电路供给,提供 50Hz 的电流。高速摄像机由摄像头、主机、控制器三部分组成。摄像机可采用手动触发或信号触发,也可以用高低电平触发,以保证与其他记录仪器(如多通道示波器)的同步。两个图像输入口可以同时进行两组图像的记录。两个 BNC 图像输出端可以向计算机、电视、VCR 或硬拷贝打印机传送信息。最大拍摄速度为 12000 帧/s。

图 5.6-17 中,在回路中接入分流器,高速摄像机触发信号由流经分流器的短路电流提供。断路器开断时电弧运动图像经 CCD 摄像头转化为数字信号,存储在高速摄像仪内。经过串行通信,将图像送到计算机中,并以计算机可识别的图形格式存储。用数字式高速摄像机对电弧进行拍摄的过程中应注意如下问题:

(1) 对高速摄像机的拍摄速度与拍摄范围应当进行协调。由于高速摄像机采用了分图的技术,因此随着拍摄速度增大到一定程度后,拍摄范围会有所减小。

(2) 摄像头光圈大小应适当。太大会对电弧及其产生的眩光混淆,从而影响对电弧形态的分辨。为此,可以在摄像头前加装深色滤光片。还应对摄像机的光学对比度进行调节,去掉拍摄中的杂光信号,使观察电弧形态更清晰。

2.2.2 光纤阵列拍摄技术

2.2.2.1 光纤阵列拍摄

光纤阵列拍摄电弧技术在国内外都有研究,广泛用于低压限流断路器的电弧运动过程研究。由于限流开断过程十分短暂,开断过程中许多现象发生在数微秒或数十微秒的时间内。因此,对电弧运动过程的观测就需要专门的仪器,电弧

运动光纤测试系统是其中之一。

在低压限流断路器研究中,广泛采用了基于光纤的电弧运动测试系统。在国外,比较有代表性的是 McBride 的测试系统,该系统采用 22 根光纤,每微秒可以出 1 幅图。在国内,西安交通大学的研究者最早采用的光纤阵列技术是:借助高速数据采集系统,用 4 根光纤组成的一维阵列,构建了一个光电测试系统,用来测量低压断路器的电弧运动过程,如图 5.6-18 所示。

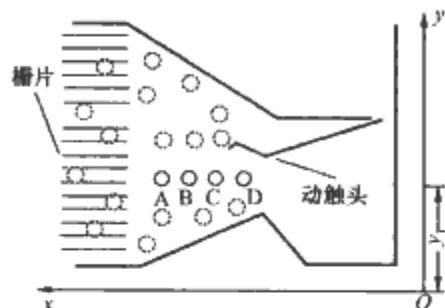


图 5.6-18 采用光纤测试电弧运动过程的示意图

光纤根数比较少,在有 4 根光纤时,只能在断路器上沿 x 方向的 A、B、C、D 配置。这样只能在 y_1 处观察电弧运动位置沿 x 方向的变化,而不能观察整个灭弧室区域内光的变化。因此,观测到的电弧运动信息是有限的。为此,通过扩充光纤的根数,让光纤分布在断路器的整个灭弧室区域内(如图 5.6-18 中的虚线圆所示),来观察低压断路器在分断过程中电弧的运动情况。把每根光纤的亮度转换成电信号后,送入计算机进行后处理,利用计算机动画技术,可在屏幕上得到电弧运动过程随时间变化的图像。所谓光纤阵列就是把多根光纤安置在一个二维平面上作均匀分布,因而 1 根光纤就相当于图形中的一个像素点,光纤的多少也就决定了摄像系统的空间分辨率。

二维光纤阵列测试系统相当于一套数字式高速摄影系统,它不但可以记录电弧运动的图像,还可以用于其他强光源瞬态图像的记录。它与传统的机械式高速摄影机比较,后者拍摄前准备工作和后处理工作十分繁重,胶卷使用量大,并且同步困难,往往因抓不住所需的过程而造成浪费。在二维光纤阵列电弧图像测试系统中,通过采用高速采集、高速存储器等技术,拍摄速度可达 10^6 帧/s,并且成本低,使用方便。

2.2.2.2 二维光纤阵列电弧图像测试系统

二维光纤阵列电弧图像测试系统由硬件和软件两部分组成,其结构原理如图 5.6-19 所示。硬件部分包括 6 个功能模块和一台微机,功能模块分别是:光纤阵列、光电转换、系统直接采样存储、总线控制、触发与系统监控。光纤阵列接受的光信号输入光电转换模块,通过光敏器件转化为电信号后进入直接采样存储模块,由多路模数转换 A/D 芯片转化为数字信号。

为了提高数据采样速度,采用数字信号同步锁存的办法,然后进行编码,再把结果高速写入存储器中。测试过程由系统总线控制模块进行控制,它由硬件控制电路、双总线选择电路及单片机 CPU 组成。当触发模块输入触发信号,硬件控制电路被触发,将发出锁存信号、编码信号、存储写信号和地址信号,以便把接受的光信号通过模数转换后,在脱离 CPU 干预的情况下,把记录数据直接存储到存储器 RAM 中去。试验结束后,单片机负责把 RAM 中的数据通过串口送到计算机中,依靠专门的图像处理软件,可生成记录的动态图像。

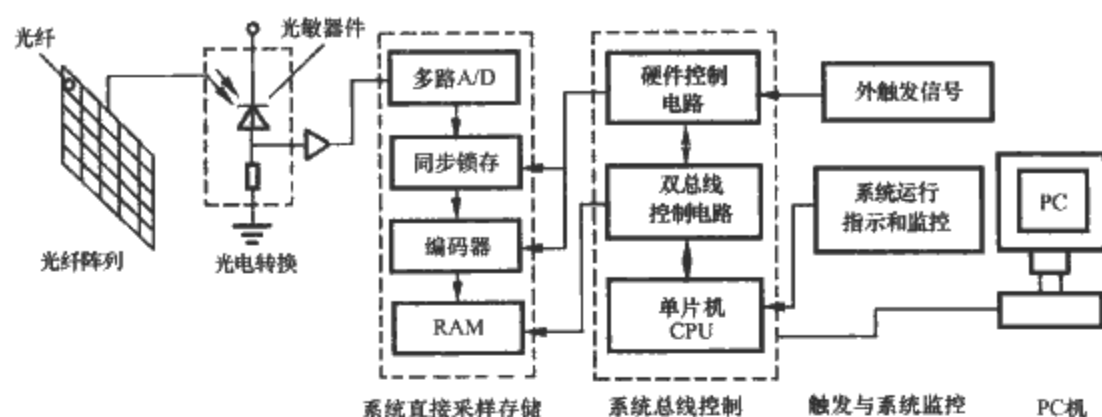


图 5.6-19 二维光纤阵列电弧测试系统结构原理图

2.2.2.3 二维光纤阵列电弧图像测试的实现

采用光敏器件直接采光，由于光敏器件尺寸大，在感光面一定的条件下，将导致空间分辨率降低。随着光纤技术的发展，使得各种类型的光路设计简化，且光纤的直径可做得很小，有利于提高空间分辨率。接受二维光纤阵列光电信号，需用多通道采样技术的支持。对于多通道系统的同时采样过程，一般有如下两种思路：

(1) 借助于高速电子开关，共用一片高速 A/D 器件，循环对各个通道进行转换，这有助于降低系统的造价。但是，这种方法在采样通道比较多时，采样速度难于提高。

(2) 一个通道配置一块 A/D，这样做无疑具有最优的性能指标，例如转换速度快、效率高等。这种方式的硬件成本比较高，但为了提高光电测试系统的转换速度，应当采用这种方式来设计系统硬件。

当采用 8 位 A/D 时，从全 0 到全 1 共有 256 种组合码可以用于表示光电信号电平的高低。但在最后的软件处理过程中，大多数情况下分为 8（或 16）个区段来表示不同的亮度。有鉴于此，为了降低成本，对每个通道采用比较器组成一个三位平行 A/D 转换器实现模数转换。按照这种设计方式，可以把现有的 8 位存储器 RAM 按照 3 个数据位组成一组，分别分配给不同的通道使用，以节约数据存储器数目，进一步降低光电测试系统的硬件成本。

在增加光纤数目和提高数据采集速度的同时，还必须解决快速存储问题。目前，利用模拟存储技术，实现连续的高速存储是不可能的。所以，采用微电子技术，将由光信号转换来的电信号，经过模数转换后，存到存储器中，以实现快速保存。但是对信号进行模数转换和存储，由计算机实时完成是不行的，这是因为 CPU 执行一条指令的时间正好是若干微秒。所以，需要设计一套硬件时序电路，用来控制信号的转换与存储。信号的后端处理，可在试验结束后进行。借助微机来实现不同的功能要求，这样整个系统就要求设计成双总线系统。硬件采用数字信号同步锁存的办法，代替模拟信号的同步“曝光”操作，大大提高了电弧运动过程的采集速度，时间（比较器工作时间）可减小到 $1\mu\text{s}$ 以下。同时为了可靠采集并延迟采集过程的持续时间，为每个通道配置 32KB 的数据存储器。对电弧测试系统的设计和实现，基本上是沿着两个方面来提出性能要求的：其一就是要有尽可能短的采样时间，这对观察暂态过程具有十分重要的意义；其二就是光路中的感光点应尽可能多，这是空间分辨率的要求。这两个指标用时间分辨率和空间分辨率表示。时间分辨率高，才能捕捉到电弧运动过程中一些细微的变化过程和现象；空间分辨率越高，观察到的电弧形态越逼真，图像越清晰。

在硬件设计中，在保证时间分辨率的前提下，为了尽可能地提高空间分辨率，并便于系统的扩充，测试系统应采用

模块化设计方式，把光电转换和模数转换部分设计成一个标准的模块，该模块由 16 个通道组成。这样，每增加一块印刷电路板，可增加 16 个通道，因此空间分辨率可以在一定的范围内扩大。

2.2.3 开关电弧图像 CCD 采集系统

2.2.3.1 CCD 技术

电荷耦合器件（Charge Coupled Devices, CCD），是 20 世纪 70 年代发展起来的新型半导体器件。它由美国贝尔实验室的 W. S. Boyle 和 G. E. Smith 于 1970 年首先提出，在经历了一段时间研究之后，建立了以一维势阱的模型为基础的非稳态 CCD 基本理论。30 多年来，CCD 的研究取得了惊人的进展，特别是在像传感器应用方面发展迅速，已成为现代光电子学和现代测试技术中最活跃、最富有成果的新兴领域之一。

电荷耦合器件是以 MOS（金属—氧化物—半导体）为基本单元构成的图像传感器集成电路。它不同于以电流或电压为信号的其他大多数器件，而是以电荷作为信号的器件。其基本功能是电荷的存储和电荷的转移。因此，CCD 工作过程的主要问题是电荷信号的产生、存储、传输和控制。

电荷耦合器件一经问世，人们就对它在摄像领域中的应用产生了浓厚的兴趣，设计出各种 CCD 线阵摄像器件和 CCD 面阵摄像器件。CCD 摄像器件不但具有体积小、重量轻、功耗小、工作电压低和抗烧毁等优点，而且在分辨率、动态范围、灵敏度、实时传输和扫描等方面的优越性，也是其他摄像器件无法比拟的。

20 世纪 80 年代发展起来了一种新型器件——高帧频 CCD，它的问世将高速摄像技术和 CCD 技术相结合，产生了高速 CCD 视频技术，不仅具有 CCD 的优点，而且具有实时性强、可直接与计算机接口等特点，可做到实时记录、再现、实时解析处理，摆脱传统暗室作业。同时，目前高速 CCD 视频系统的帧频完全覆盖了应用最广的间歇式和棱镜补偿式高速摄影机的帧频范围，高速摄影领域正面临高速 CCD 视频系统代替传统光机式高速摄影系统的变革。目前，国内外都在这一方面进行研究，并应用到电弧的拍摄中。

2.2.3.2 真空电弧的 CCD 拍摄技术

真空断路器与空气、油、磁吹、 SF_6 断路器相比，其最大的特点是灭弧系统简单，只需一个真空灭弧室。真空断路器能否可靠地开断线路电流就取决于灭弧室内电弧形态及其转变。为克服动态图像高速微机采集系统空间分辨率低的缺点，西安交通大学利用高速摄影系统对真空灭弧室内的真空电弧形态进行了观察，研制出带电子快门的 CCD 真空电弧图像摄影系统。该采集系统的特点如下：

(1) 利用计算机进行阿贝尔变换得到的真空电弧光强径向分布和电子密度空间分布，通过两个波长相近的滤波片拍

摄真空电弧图像,经“二比色法”求得真空电弧电子温度分布。实际上比色测温误差较大,但它是一种非接触的测温方法。

(2) 图像重放时间短,运行费用低。

(3) 该采集系统 20ms 内只能抓拍一幅真空电弧图像,存在着不能连续拍摄和时间分辨率低的缺点。若要连续拍摄,可通过计算机同步控制的多台 CCD 摄像机来完成。

真空电弧图像测试系统线路如图 5.6-20 所示,可拆灭弧室侧面开有观察窗,以便于对电弧进行观测。可拆灭弧室内的上下各固定有一个可拆卸的(直径为 90mm) 1/2 匝纵磁线圈的 CuCr 触头,下面的为阴极触头,经瓷套与可拆灭弧室下端盖固定,上面的为阳极触头,经波纹管与瓷套相连,其上、下位置可调,以改变触头开距,点火针固定于阴极上,经与下端盖绝缘的接线柱引出。可拆灭弧室与机械泵和涡轮分子泵相连,构成真空排气系统,在试验过程中,机械泵和涡轮分子泵始终处于工作状态,以维持灭弧室内的真空度在 $6 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 以下。

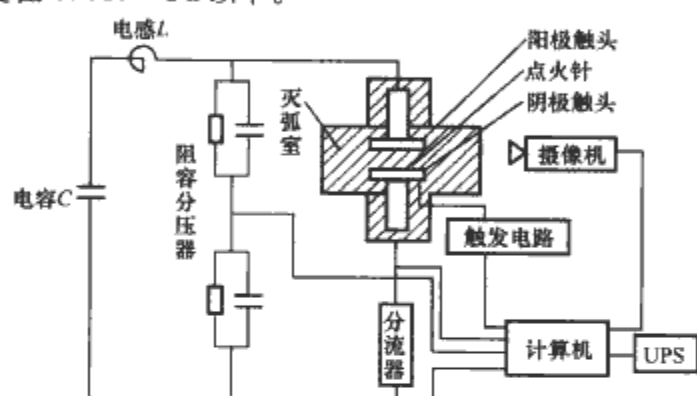


图 5.6-20 测试系统线路图

电容 C 上充电到某一电压后,使灭弧室阴极上的点火针触发电火,灭弧室两触头间产生真空电弧并导通电流,该电流通过由 L (110 μH)、C (90000 μF) 构成的单频振荡回路,其振荡频率为 50.5Hz。

真空电弧图像测试系统利用 CCD 摄像机拍摄图像时,其输出为标准的全电视信号,速率为 50 帧/s,即 20ms 输出一帧图像。真空电弧通常燃弧 10ms,故在燃弧时间内只能拍摄到一幅图像,而且要求 CCD 摄像机的曝光时刻和燃弧过程同步。由于 CCD 摄像机曝光时刻与帧同步信号的上下沿同步,外部不能改变,而燃弧时刻是可控的,因此只能使真空电弧燃弧过程同步于摄像机。

2.2.3.3 电弧的 CCD 连续拍摄技术

随着对电弧测试系统的空间分辨率要求的提高,要求光纤的根数更多,光电转换的光电管数量也越多,每个光电管感光度的不一致性就显现出来,同时系统也比较庞大。河北工业大学设计了一种电弧 CCD 拍摄系统,该系统采用一根光纤进行电弧的拍摄。电弧的空间分辨率取决于 CCD 的分辨率,电弧图像的时间分辨率取决于 CCD 和高速缓冲接口电路。利用该系统对电弧动态过程的图像拍摄可以消除光路的边缘效应、图像不同步及每一像素灰度等级低等缺点。高速缓冲存储器可达到 64MB,传输时间为 40ns,对于 64 \times 64 像素的电弧图像,可在 DSP 接口单元上存储 13312 帧。用高速 CCD 实现电弧拍摄的测试系统结构框图如图 5.6-21 所示。为了提高整个系统的时间和空间分辨率,在保证传输速率的前提下尽可能提高图像的空间分辨率和灰度等级。本系统采用 64 \times 64 像素的 256 灰度级的 CCD,它的时间分辨率可达 1 万帧/s。

为了便于在较小的低压电器触头附近进行拍摄,前端采



图 5.6-21 开关电弧采集系统

用直管纤维镜,其直径为 $\phi 2\text{mm}$ (或 $\phi 4\text{mm}$),视角范围 60° 。直管纤维镜通过卡口与析光镜相连,通过析光镜的目的是将电弧分成两路,一路通过透镜给 CCD 芯片,使其在 CCD 上产生图像。另一路给目镜,使观察者通过目镜可以看到被测物体,也可在正式测试电弧前,通过目镜预调焦距。

在整个电弧测试的过程中,必须保证计算机控制 CCD 同步拍摄,即燃弧开始时,CCD 必须同步拍摄。否则,初始阶段的电弧图像信息有可能丢失。通过设计同步触发电路,可以实现同步拍摄。同步触发方式有两种:一种是被动式触发,即外部提供触发信号给计算机,计算机起动电弧拍摄;另一种是主动式触发,即计算机发出触头打开指令的同时,起动电弧拍摄。在该系统中,可以通过计算机对拍摄时间长短(或帧数多少)进行设置,因此可以实现对电弧的连续拍摄,实现了从电弧产生到电弧熄灭全过程的拍摄。

图 5.6-22 是试品为 CJX1-12/22 交流接触器,触头负载电流为 5A,电压为交流 220V 条件下拍摄的一帧电弧图像。



图 5.6-22 开关电弧图像

2.3 电弧图像处理方法

在拍摄图 5.6-22 所示开关电弧图像的系统中,采用卤钨光源照明,但经过直管纤维镜、析光镜和三透镜后衰减了许多,CCD 的积分时间很短,从而使电弧图像中虽可以清晰看出燃弧形态,但灭弧室及触头图像均无法直接观察到,因此需要采用数字图像增强算法来改善视觉效果。

电弧图像增强的目的是采用一些技术手段有选择地突出图像中电器触头等弱信息。由于电弧的形态、亮度、分布等特征对于开关电器的分断过程分析有重要意义,因此,有必要全面保留电弧特征。图像增强就是采用一种方法把原始图像中像素的灰度级变换到目的图像中另一灰度级,按照图像的像素灰度进行变换。具体方法有点对点、掩模(空域滤波)、直方图等方法,直接对图像像素点灰度进行线性或非线性变换,但在增强弱特征的同时对噪声也进行了放大,影响图像增强的视觉效果。频域法是间接处理图像像素的灰度,首先将图像从空间域按照某种变换模型变换到频率域,然后在频率域空间对图像进行处理,再将其反变换到空间域,得到处理后的图像。在电弧图像增强中,主要是增强电弧图像中的触头系统和灭弧系统弱特征,即增强原图的电器触头与背景之间的反差。

小波变换是最近发展起来的变换域信号处理技术,广泛应用于图像处理领域。利用小波变换的多尺度分解,得到图像在不同的尺度下的低频平滑子图和高频细节子图,小波系数模值的大小对应图像灰度之间的差异。根据这一原理,对小波分解系数进行非线性变换,增强弱特征的同时削弱强特

征。应避免对图像噪声进行过度增强,对多尺度下图像噪声特性的分析,去除图像的噪声,可以达到滤除噪声和增强电弧图像对比度的目的。由于小波变换的可逆性,可以重构出对比度增强后的电弧图像,在保留电弧形态的同时,突出显示电器触头特征。小波变换虽然在图像增强中充当频域变换的作用,增强算法可以充分利用小波分析的时、频局部化特性,更加有效地提高图像增强的质量。

小波变换的基本思想是用一族函数去表示或逼近信号,这一族函数称为小波函数系。它是通过一个称为小波母函数的伸缩和平移来构成的,可表示为

$$\Psi_{j,k} = 2^{j/2} \Psi(2^{-j}t - k) \quad (j, k \in Z) \quad (5.6-3)$$

式中: Z 为整数集合; j 为伸缩参数; k 为平移参数; $\Psi(t)$ 为母小波。

$\Psi(t)$ 函数经过伸缩和平移得到一族离散小波函数,构成平方可积函数空间 $L^2(R)$ 的标准正交基。使得空间 $L^2(R)$ 中的任何一个函数 $f(t)$ 都可以用小波序列表示为

$$f(t) = \sum_{j,k \in Z} d_{j,k} \Psi_{j,k}(t) \quad (5.6-4)$$

式(5.6-4)称为函数 $f(t)$ 的小波变换。式中, $d_{j,k}$ 可以看成函数 $f(t)$ 在小波函数系上的投影,称为小波变换系数。

$$d_{j,k} = \langle f, \Psi_{j,k} \rangle \quad (5.6-5)$$

式(5.6-5)为小波变换表达式。

设 $\varphi(x, y)$ 和 $\psi(x, y)$ 分别为二维尺度函数和小波函数, J 为图像分解层次,则对任意一幅图像 $f(x, y)$, 其小波分解的表达式为

$$f(x, y) = \sum_{n \in Z} c_{j,n} \varphi_{j,n}(x, y) + \sum_{k=1}^J \sum_{n \in Z} d_{k,n} \psi_{k,n}(x, y) \quad (5.6-6)$$

式(5.6-6)中,等号右边的一项是低分辨率的图像,后一项是不同频带的子图像。小波变换具有多尺度分析能力,小波的尺度与频率等价,并与频率成反比;而小波的空间定位性又使图像的一些二维特征能够在变换空间中保留下来。这样通过一些几何约束就能抽取不同尺度层次、不同方向的图像特征。为了增强图像各子带频率成分,引入了增益系数。增益系数的不同设定,既可以使图像灰度微小变化构成的细节边缘得到增强且层次感强,又可以任意使图像的某些局部感兴趣区域更加突出。由于图像噪声的 Lipschitz 常数是负数,其对应的小波模极大值将随着尺度的增加而减小,而对于原始信号,一般其小波变换的梯度幅度随尺度增大而增大,或至少随尺度增大而保持不变。所以在较高分解层开始增强小波系数,不会引起噪声加强。

基于小波变换的图像增强技术在逐步发展,其中 \hat{A} trous 算法是用一个线性平滑滤波器,在不同分解层次上通过零插值实现尺度变换。 \hat{A} trous 算法的分解结果是原始图像的平滑滤波图像和不同尺度下的小波变换系数集合,每个尺度下的小波变换系数个数等于图像的像素数。 \hat{A} trous 算法的优点是其反变换非常简单,可以定义为

$$S_n + \sum_i C_i \rightarrow I \quad (5.6-7)$$

式中: S_n 为第 n 层分解后的平滑图像; C_i 为第 i 层分解系数; I 为反变换得到的图像; i 为分解的层次; n 为分解的层数。

采用小波变换后,为了得到合理的图像增强效果,可以采用不同的系数变换方法。通常采用 S 形或采用双曲线函数进行变换。由于电弧图像中电器触头图像的灰度比较低,需要进行大比例增强,而电弧弧柱的亮度比较大。为了保持

弧柱形态特征,弧柱区域灰度应为线性变换或稍有衰减,而且要求反变换后的图像中不产生伪像,因此电弧图像增强小波系数变换函数应采用非线性函数。

电弧图像小波分解后,首先要区分电器触头区域和电弧弧柱区域,即小波系数如何与之对应,最简单的方法是采用阈值法。假设阈值为 C ,小波系数模值小于 C ,认为其对应电器触头区域和背景特征,而大于 C 的小波系数认为其决定电弧弧柱区域特征。如果采用如下系数变换函数

$$C_{out}(j, k) = \begin{cases} Ac_i(j, k) < C & (A > 1) \\ Bc_i(j, k) \geq C & (B < 1) \end{cases} \quad (5.6-8)$$

放大倍数 A 、 B 的不同选择,小波系数在 C 附近放大后出现不连续,由于变换函数的非连续性造成重构图像中出现伪像。另外变换函数必须是单调递增的,即变换函数 $Ac_i(j, k)$ 对所有的小波系数 $c_i(j, k)$,如果 $|c_i(j, k)| > |c_i(j, k+1)|$,则 $Ac_i(j, k) > Ac_i(j, k+1)$,否则重构图像中也会出现伪像。定义如下变换函数

$$C_{out}(j, k) = [A + \ln(|c_i(j, k)| + 1)/\ln B] \text{sign}[c_i(j, k)] \quad (5.6-9)$$

式(5.6-9)中, sign 是符号函数,保证系数变换前后同号; A 、 B 为正实数,选择不同的参数 A 、 B ,指数函数的曲线形状不同,即对小波系数的放大倍数不同,从而优化图像视觉增强效果。实际应用中,通过指定指数曲线上两点方式,确定函数参数,例如 $(0.2, 1.0)$ 、 $(1.5, 1.5)$,即小波系数的模值为 0.2 时放大 5 倍,小波系数为 1.5 时不进行放大,相当于指定阈值 $C=1.5$ 。

由于图像噪声和图像弱特征在小波分解后小波系数均为模值比较小的系数,如果不采取措施,在对弱特征增强的同时不可避免地噪声也进行了增强,从而影响图像增强的视觉效果。由于 CCD 器件特性和试验现场光源的不稳定性等因素的作用,电弧图像中同样存在噪声,因此在对电弧图像进行增强时也必须考虑噪声的过度增强问题。图像中噪声点通常是孤立的,因此噪声在小波分解的不同层次上是弱相关的,可通过计算小波系数在不同分解层次的相关性来决定图像的噪声阈值,对低于噪声阈值的小波系数不进行变换,以避免电弧图像中噪声过度增强。

图 5.6-22 中所示电弧图像经过利用 \hat{A} trous 算法,采用 Symlets 小波,进行三层分解,然后确定噪声阈值为 0.003,并经过式(5.6-9)的非线性变换,重构的图像如图 5.6-23 所示。由重构可明显看出电器动触头的形状和位置,取得了较好的视觉效果,但由于电器动触头分断过程的运动造成的模糊现象仍然存在,并且背景信号特征比较弱,需要进一步处理。



图 5.6-23 基于小波变换的增强图像

采用基于小波变换的图像背景增强算法,在保留电弧弧柱强特征的同时,突出显示电器动触头图像特征,并且抑制图像噪声的过度增强,重构后的电弧图像适合人眼特征,为研究人员分析电弧动态过程和开关电器的分断过程建立了基础,可以取得较好的电弧图像增强效果。

续表

影响量		标称使用范围 (另有标志者除外)	允许改变量 (用等级指数的百分数表示)
交流被测量的频率		标准频率±10%或标准频率范围下限-10%和标准频率范围上限+10%	100%
外磁场		0.4kA/m	基准值的 0.75%~6%
外电场 (只适用于静电系仪表)		直流和 45~65Hz 20kV/m	100%
辅助电源	电压	标称值±10%或标准范围下限-10%和标准范围上限+10%	50%
	频率	标称值±5%或标准范围下限-5%和标准范围上限+5%	50%

1.1.2 基本误差

(1) 引用误差。指示仪表的误差是以引用误差来表征的。相对误差虽然可以评价测量的准确程度，但却不能用来评价指示仪表的准确度。这是因为指示仪表可测范围不是一个点，而是一个量程，在仪表标度尺的不同部位，其绝对误差是不相同的，即使绝对误差在仪表标度尺的全长上保持恒定，随着被测量的减小，相对误差将增加，且有增至无限大的趋势。这样，就使得在仪表标度尺的各个不同部位，相对误差不是一个常数，而且变化很大，因此引出引用误差的概念。

引用误差 γ_m 为指示仪表示值的绝对误差 Δx 与其测量范围上限 x_m 之比，通常用百分数表示，即

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \tag{5.7-1}$$

由于仪表各示值的绝对误差不一定相等，为评价仪表的准确度，式 (5.7-1) 中的分子取仪表示值中的最大绝对误差 Δx_m ，则仪表的最大引用误差或仪表的允许误差 γ_{mm} 为

$$\gamma_{mm} = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \tag{5.7-2}$$

(2) 基本误差极限。指示仪表的基本误差用引用误差来表示，其最大基本误差用式 (5.7-2) 来计算。指示仪表在规定的标准条件和使用范围极限内，并按说明书使用时，在其标度尺的工作部分的所有分度线上可能出现的最大基本误差的百分数，称为仪表的准确度等级 K 的百分数，即

$$K\% = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \tag{5.7-3}$$

指示仪表的准确度等级用标准条件下的准确度等级指数 K 表示。所谓等级指数是标志准确度等级的数字。国家标准对各类测量仪表的准确度等级都有规定，指示仪表可按以下等级指数表示的准确度等级之一分级：0.05，0.1，0.2，(0.3)，0.5，1，(1.5)，2，(2.5) 和 5 级，括号内为不推荐使用的级别。

在标准条件下指示仪表的基本误差极限值不得超过 $K\%$ 。最大允许误差与准确度等级的关系是把带有正、负号以百分数表示的等级指数作为误差极限。例如，等级指数为 0.5，则基本误差极限为基准值的 $\pm 0.5\%$ 。

1.2 分类

电测量指示仪表可以按工作原理、使用条件、使用方式、防护性能、读数装置形式、被测量种类等多种方式分类。

(1) 按工作原理分类。可分为磁电系、电磁系、电动系、铁磁电动系、感应系、静电系、热电系、整流系、振簧系等。

(2) 按使用条件分类。可分为 P，S，A，B 四组。其中，P 组为普通型仪表；S 组为普特型仪表；A 组为用于室

内的宽使用环境条件仪表；B 组为用于室外的宽使用环境条件仪表。

(3) 按读数装置形式分类。可分为指针式仪表、光指示仪表。

1.2.1 电流表、电压表、功率表

(1) 电流表又称安培表。按所测电流的大小可分为检流计（可测小于 $1\mu A$ 的电流）、微安表、毫安表及安培表等。按作用原理，常用的有磁电系、电磁系、电动系、铁磁电动系及整流系等。

(2) 电压表又称伏特表。按所测电压的大小可分为微伏表、毫伏表及伏特表等。按作用原理，常用的有磁电系、电磁系、电动系、铁磁电动系、静电系及整流系等。

(3) 功率表又称瓦特表，用于测量有功功率和无功功率。按所测电路的相数，功率表有单相和三相两种，分别用于测量单相和三相电路的功率。按作用原理，常用的有电动系和铁磁电动系两种。

1.2.2 频率表、相位表、功率因数表

(1) 频率表是直接用于测量电路中信号频率的仪表。按作用原理，常用的有电动系、铁磁电动系、电磁系、磁电系附变换器式等。

(2) 相位表是测量电路中两个频率相同、波形相似的交流信号之间的相位的仪表。按作用原理常用的型式与频率表相同。

(3) 功率因数表是用于测量电路中功率因数的仪表。如果将相位表的标度尺按相位的余弦刻度，就是功率因数表。

按所测电路的相数，相位表（功率因数表）有单相和三相两种，后者用于测量对称三相三线制中对称负载的相位角或功率因数。

1.2.3 电阻表

电阻表按所测电阻的大小可分为电阻表和绝缘电阻表。

(1) 电阻表又称欧姆表。常用于一般电阻的测量，测量范围为 $1\sim 10^6\Omega$ 。

(2) 绝缘电阻表又称兆欧表。多用于测量绝缘材料的绝缘电阻，测量范围为 $10^6\sim 10^{10}\Omega$ 。

1.3 使用方法

1.3.1 仪表的量程选择

指示仪表有单量程的也有多量程的。一个被测量可用不同量程仪表或同一仪表的不同量程测量。在实际使用时，应在仪表正常工作范围内优选使用测量准确度最高的量程。

根据准确度表达式即式 (5.7-3)，仪表在标准条件下测量时，测量结果可能出现的最大绝对误差 Δx_m 为

$$\Delta x_m = \pm K\%x_m$$

那么，用该仪表对某一被测量 x 进行测量时，可能出现的最大相对误差 γ_m 为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x} = \pm K\% \frac{x_m}{x} \quad (5.7-4)$$

式 (5.7-4) 表明, 当仪表的准确度等级给定时, 被测量 x 越小, 测量结果的相对误差越大; 被测量 x 越接近仪表的上量限 x_m , 测量误差就越接近仪表准确度等级的百分数。

【例 5.7-1】 被测电压为 100V, 用单向标度尺的 0.5 级、量程为 0~300V 和 1.0 级、量程为 0~100V 的两个电压表分别测量, 求测量时最大可能出现的相对误差各为多少。

解: 用 0.5 级、量程为 0~300V 的电压表测量时, 可能出现的最大相对误差为

$$\gamma_{m1} = \pm K\% \frac{x_{m1}}{x} = \pm 0.5\% \times \frac{300}{100} = \pm 1.5\%$$

用 1.0 级、0~100V 的电压表测量时, 可能出现的最大相对误差为

$$\gamma_{m2} = \pm K\% \frac{x_{m2}}{x} = \pm 1\% \times \frac{100}{100} = \pm 1\%$$

从例中可以看出, 如果量程选择得当, 用 1.0 级仪表测量, 反而比用 0.5 级仪表测得准。由此可知, 仪表的准确度等级对测量结果的准确程度影响很大。但是, 仪表的准确度等级并不就是测量结果的准确度。后者不仅与仪表的准确度等级有关, 还与仪表的量程有关。只有仪表运用在满量程时, 测量结果的准确度才等于仪表的准确度等级。因此, 不能把仪表准确度等级和测量结果的准确度混为一谈。根据这个理由, 选用仪表时要纠正单纯追求准确度等级越高越好的错误认识, 而应根据被测量数值的大小及对测量结果准确度的要求, 兼顾准确度等级和测量上限值进行合理选择。

(1) 电流表和电压表。在低压电器试验中, 常用的指示式电流表和电压表其准确度等级为 0.5 级。为了提高测量准确度应提高被测量与量程之比, 推荐取该比值为 2/3~1; 在被测电流或电压为突然施加的情况下, 为避免仪表指针承受撞击, 该比值取 0.5~0.8 为宜。现举例说明量程选择对测量误差的影响。

【例 5.7-2】 用准确度等级为 0.5 级的电压表在标准条件下测 40V 电压。

当电压表量程为 100V 时, 可能出现的最大相对误差为

$$\gamma_m = \pm 0.5\% \times \frac{100}{40} = \pm 1.25\%$$

当电压表量程为 50V 时, 可能出现的最大相对误差为

$$\gamma_m = \pm 0.5\% \times \frac{50}{40} = \pm 0.625\%$$

(2) 功率表。在低压电器试验中, 常用的电动系功率表其准确度等级为 0.5 级。为了减小测量误差, 被测功率的电压分量与功率表额定电压之比推荐选用范围为 0.85~1.15; 电流分量与功率表额定电流之比推荐选用范围为 2/3~1 或 0.5~1。

(3) 相位表 (功率因数表)。在低压电器试验中, 常用的电动系相位表有两种: 一种准确度等级为 1.5 级, $\cos\varphi$ 测量范围为 0~1; 另一种准确度等级为 1.0 级, $\cos\varphi$ 测量范围为 0.5 (容性)~1~0.5 (感性)。

为了减小测量误差, 被测相角电压分量与相位表额定电压之比推荐选用范围是 0.85~1.15; 电流分量与相位表额定电流之比推荐选用范围是 0.4~1。

1.3.2 仪表的连接

(1) 电流表和电压表。测量电流的电流表在电路中与被测电流电路串联。为了使电路的工作状态由于电流表的接入而引起的变化尽可能小, 要求其内阻 R_{PA} 越低越好。这样才

能减少仪表本身的功率损耗 $I^2 R_{PA}$ 。

测量电压的电压表在电路中与被测电源或负载两端并联。为了使电路的工作状态由于电压表的接入而引起的变化尽可能小, 与电流表相反, 要求其内阻 R_{PV} 越高越好。这样才能减小仪表本身的功率损耗 U^2 / R_{PV} 。

仪表的内阻是客观存在的, 不考虑它的影响会给测量带来很大的误差。例如, 对于测量电流来说, 要求电流表的内阻越低越好。因为电流表是与被测对象串联的, 若电流表内阻高, 则会使被测电路的电流下降; 对于测量电压来说, 要求电压表的内阻越高越好。因为电压表是并联在被测对象上的, 若电压表内阻低, 则会使被测对象两端电压下降。由于电流表的内阻不为零, 电压表的内阻不为无穷大, 它们的接入将会改变被测量的数值。由于测量仪表的功率损耗不为零, 它接入电路后所引起的误差叫做方法误差。

测量电路中仪表的连接方式, 也有产生测量方法误差的因素。例如, 线圈电阻可以通直流电用电压表和电流表测量, 即测出线圈两端的电压和通过线圈的电流, 用欧姆定律间接计算线圈电阻值。测量时的连接线路有两种, 如图 5.7-1 所示。

在图 5.7-1 (a) 中, 电压表所测量的不仅是被测线圈电阻的压降, 还包括电流表的压降, 因此实际上由仪表读数算出的电阻值为 R_x 与 R_{PA} 之和。在图 5.7-1 (b) 中, 电流表所通过的电流不仅是通过被测线圈的电流, 还包括通过电压表的电流, 因此实际上由仪表读数算出的电阻值为 R_x 与 R_{PV} 的并联值。显然, 图 5.7-1 (a) 所示线路适用于测量较大的电阻; 图 5.7-1 (b) 所示线路适用于测量较小的电阻。

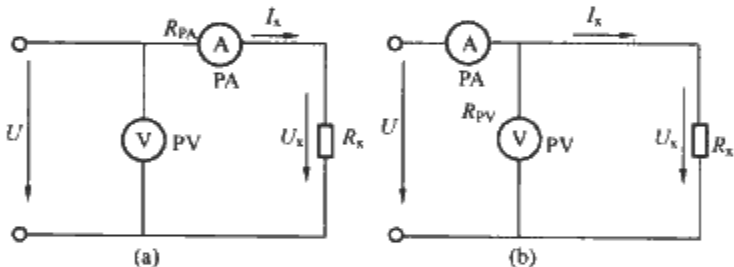


图 5.7-1 用电压表和电流表测量电阻

(a) 电压表前接方式; (b) 电压表后接方式

为了减小测量误差, 一般电流表的内阻应小于被测支路电阻的 1/100; 电压表的内阻应大于被测对象电阻的 100 倍。应尽量选用功率损耗较小的仪表, 例如, 交流电流表和电压表选用电磁系较电动系仪表功率损耗要小。各种仪表消耗功率的大概值见表 5.7-3。在一般情况下, 推荐采用电压表前接方式电路; 在负载电流较大的情况下, 有可能用电压表后接方式测量方法误差相对更小。实际应用时, 要根据仪表阻抗和被测电路的具体情况具体分析。

表 5.7-3 各种仪表消耗功率的大概值

仪表类型	表耗功率 (W)	
	电流表或电流线路 (5A)	电压表或电压线路 (100V)
磁电系	0.2~0.5	0.1~1
电磁系	1~2.5	4~6
电动系	3.5~10	6~12
整流系	0.2~0.5	0.1~1

(2) 功率表和相位表。功率表或相位表有两个线路: 一个是串联线路或电流线路, 另一个是并联线路或电压线路。在测量功率或相位的电路中, 仪表的电压线路应与被测的电压分量电路并联连接, 电流线路应与被测的电流分量电路串联连接。

例如,在测量线圈的功率时,测量电路可以有两种连接方式,如图 5.7-2 所示。

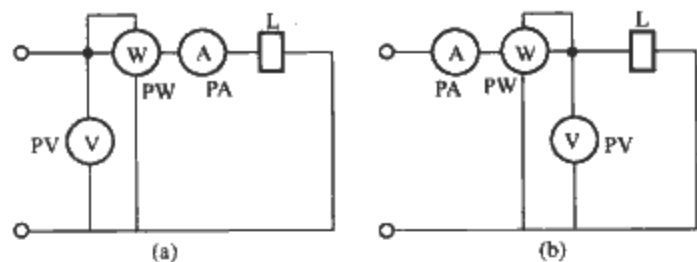


图 5.7-2 电压线圈的测量电路
(a) 功率表前接方式; (b) 功率表后接方式

两种测量电路中,均有产生测量方法误差的因素。在图 5.7-2 (a) 中,功率表的实际测量值较应测量值增加了功率表电流线路的功率损耗;在图 5.7-2 (b) 中,功率表的实际测量值较应测量值增加了功率表电压线路的功率损耗。

1.3.3 电阻表使用方法

(1) 电阻表(欧姆表)。

- 1) 调零。在测量之前将两测试棒短接,调节零位调节电阻,使指针指在零电阻示值上。
- 2) 不能测量带电的电阻。
- 3) 被测电阻不能有并联支路。
- 4) 不能测量微安表、检流计及标准电池等仪器的内阻。
- 5) 不能让两测试棒长期短接。

(2) 绝缘电阻表。

1) 绝缘电阻表有不同的电压等级,应按电器的额定工作电压来选择。绝缘电阻表的电压等级越高,绝缘结构的质量缺陷越易发现,但应注意其电压等级不应超过电器的电气强度电压值,以免造成击穿或损害。

2) 绝缘电阻表上有三个接线柱:“线”(L)、“地”(E)、“屏”(G),在进行一般测量时,只要把被测绝缘电阻接在 L 与 E 之间即可;但对测量表面不干净或潮湿的情况,为了准确测量绝缘材料的内部电阻,必须使用 G 接线柱,以消除漏电流影响。

3) 测量时要把绝缘电阻表放平稳,以避免仪表的转动部分产生误差,同时也应避免摇动手柄时指针的摆动现象。

4) 绝缘材料的绝缘电阻值与所施电压有关,一般随电压的升高而降低。因此,尽管电压的变化不反映在电流比值上,相应的偏转角保持不变,但考虑被测绝缘电阻随施加电压而变化,所以测量时手摇发电机的转速应保持一定,约 120r/min,以保持输出电压稳定。

5) 绝缘材料的绝缘电阻值还与通电时间有关,这是由于测量时两电极间总存在分布电容,开始施压时,除有泄漏电流外还有电容器的充电电流,因而电流较大、绝缘电阻值较低。经一段时间电容器充电结束后只有泄漏电流,因而绝缘电阻值升高,因此,测量时应读取仪表指针稳定后的数值,对电器产品而言,一般需 1min 便能基本达到稳定。

2 数字仪表

数字仪表是一种包含模/数变换器并以十进制数码形式显示测量结果的仪表。

这是一种新型仪表,它把电子技术、计算技术、自动化技术的成果与精密电测量技术密切结合在一起,现已实现了“智能化”,并能通过标准接口组成自动测试系统。由于数字仪表具有读数方便、没有视差、准确度高、功率损耗小、灵敏度高优点,在很多电量和非电量测量中已越来越多地被采用。

2.1 类型

数字测量仪表的种类很多,按仪表的用途可分为:数字电压表、数字电流表、数字电阻表、数字功率表、数字无功功率表、数字静电计、电子计数器等。经过适当变换后,还可测量许多非电量,如数字温度计、数字压力计、数字位移表、数字钟等。

2.2 工作特性

2.2.1 数字电压表的主要工作特性

数字电压表(DVM)的主要工作特性有误差、测量范围、量程、分辨力、抗干扰能力、输入阻抗、零电抗、测量速度、响应时间、显示能力、显示位数及信息输出等。

(1) 误差。DVM 测得的被测量 U_x 与该被测量的实际值 U_n 之差,用绝对误差表示为

$$\Delta = U_x - U_n$$

DVM 的误差用绝对误差来表示,其表达式有

$$\Delta = \pm a\% U_x \pm b\% U_m$$

$$\Delta = \pm a\% U_x \pm n$$

$$\Delta = \pm a\% U_x \pm b\% U_m \pm n$$

式中: Δ 为绝对误差; a 为误差的相对项系数; b 为误差的固定项系数; U_x 为测量值; U_m 为满度值。

由以上表达式可见,DVM 的误差主要由两部分组成:一部分是与被测量示值 U_x 有关的项,即含 a 项误差,称为读数误差,它是数字仪表本身的固有误差,包括 DVM 标准电源电压误差、输入放大器误差、衰减器误差等;另一部分是与 U_x 无关的项,即含 b 项误差(包括 n 个字),称为满度误差,它包括 DVM 由零点漂移和噪声干扰等因素引起的误差。通常 DVM 用两项之和表示误差,即

$$\Delta = \pm a\% \times (\text{读数}) \pm b\% \times (\text{满度})$$

DVM 相对误差的表达式为

$$\gamma = \pm \left(a\% + b\% \frac{U_m}{U_x} \right) = \pm \left[(a+b)\% + b\% \left(\frac{U_m}{U_x} - 1 \right) \right] \quad (5.7-5)$$

式中: γ 为用与 DVM 测量值 U_x 之比表示的相对误差。

在满量程时, $U_x = U_m$, 有 $\gamma_{\min} = \pm (a+b)\%$ 。非满量程时, $U_x < U_m$; 当用在 1/10 量程时, $U_x = 0.1U_m$, 误差最大, 有 $\gamma_{\max} = \pm (a+10b)\%$ 。可见,为了充分利用仪表的准确度,就必须用到满量程。

(2) 测量范围。测量范围是指测量能够达到的被测量的范围。一般包括多量程的划分、各个量程的测量范围(从零到满度值的显示值)、超量程能力等。

(3) 量程。量程是指在不需改变极性或不需改变倍乘系数(如小数点位置或显示单位)的情况下,能够测量输入电压的一个连续范围。各量程测量范围的上限值通常称为满量程。在多量程 DVM 中,测量误差最小的量程为基本量程,基本量程通常是不加量程衰减器和放大器的量程。

(4) 分辨力。分辨力是指 DVM 能显示的被测电压的最小变化值,也就是使显示器末位跳一个字所需的输入电压值。在不同的量程上,DVM 的分辨力不同。通常在最低量程上,DVM 具有最高的分辨力,并以此作为 DVM 的分辨力指标。

(5) 测量速度。测量速度是指在单位时间内,以规定的准确度完成的最大测量次数,即仪表每秒钟给出显示的次数。

(6) 显示位数。DVM 的显示位数是以完整的显示数字(即能够显示 0~9 十个数码的显示能力)的多少来确定的。

能够显示“9”的数字位称为满位，不能显示至“9”的数字位称为半位或 1/2 位，半位只在最高显示位采用。

2.2.2 数字仪表的准确度

目前大多数数字仪表在为用户提供的技术指标中没有准确度等级，只有允许误差和显示位数等。一般的准确度指标有以下几种：

- (1) 基本误差。基本误差是在标准条件下经预热、预调及校准之后，仪表本身所固有的规定时间内（如 24h）的误差。
- (2) 附加误差。附加误差是影响量中的一个量（如温度、湿度、供电电压和频率等）偏离标准条件下的值或范围时所引起的误差。
- (3) 工作误差。工作误差是在额定工作条件下仪表所具有的误差极限。
- (4) 线性误差。线性误差是实际变换曲线对理想直线的

- 偏差。
 - (5) 稳定误差。稳定误差是指在规定时间内其他条件保持不变，仪表在某一校准点显示值的最大变化量，包括波动和漂移两种变动量。根据不同的时间间隔又有短期稳定误差（如 15min 或几小时）和长期稳定误差（如一个月、三个月、半年或一年）之分。
- 一般数字仪表与电子测量仪器的标准条件基本相同，包括环境温度 20℃、相对湿度 45%~75%、交流供电电压 220V、频率 50Hz 及波形为正弦波等。额定工作条件则因适用范围不同而异。
- 数字万用表在测量不同类别的量值和不同量程时，可能有不同的准确度指标。一般在测量直流电压和基本量程时准确度最高，而且在测量直流电压时测量范围也最宽。
- 以某 4 位半数字万用表为例，它在测量不同量时的指标对比情况列于表 5.7-4。

表 5.7-4 数字万用表测量不同量时的指标对比					
测量量		量程	满度	分辨力	准确度 (50Hz~10kHz)
直流电压	最低量程	20mV	19.999mV	1μV	± (0.05%读数+0.03%满度)
	基本量程	2V	1.999 9V	100μV	± (0.03%读数+0.02%满度)
	最高量程	1000V	1000.0V	100mV	± (0.05%读数+0.03%满度)
直流电流	最低量程	2mA	1.999 9mA	100nA	± (0.3%读数+0.1%满度)
	最高量程	1000mA	1000.0mA	100μA	± (0.5%读数+0.3%满度)
交流电压	最低量程	200mV	199.99mV	10μV	± (0.5%读数+0.3%满度)
	基本量程	2V	1.999 9V	100μV	± (0.3%读数+0.2%满度)
	次高量程	200V	199.99V	10mV	± (0.5%读数+0.3%满度)
	最高量程	750V	750.0V	100mV	—
交流电流	最低量程	2mA	1.999 9mA	100nA	50Hz~1kHz: ± (0.5%读数+0.5%满度)
	最高量程	750mA	750.0mA	100μA	1~5kHz: ± (1%读数+0.5%满度) 5~10kHz: ± (3%读数+1%满度)

2.3 选用方法

- (1) 在低压电器试验中，交、直流电压和电流的测量一般可选用便携式的 4 位半数字仪表。在要求准确测量交流电压和电流及直流电阻的情况下，以采用不低于 5 位半数字仪表为宜。
- (2) 量程的选择应从大于被测量的量程中取最小值，并应保证有足够的分辨力。
- (3) 由于数字仪表的功率损耗很小，在电压和电流测量中由于仪表损耗产生的测量方法误差可以忽略。
- (4) 在测量含高次谐波分量的交流电压和电流时，应选用反映真有效值的数字仪表。

3 比较式仪器

电测量指示仪表虽有很多优点，但其测量准确度却不高，要得到比较准确的测量结果，则需采用电测量仪器。电测量仪器根据比较法来实现测量目的，将被测量与已知的标准量进行比较，从而确定被测量的大小。

比较式仪器有多种类型，主要有电位差计、电桥、直流电流比较仪、指零仪及标准源等。

3.1 直流电位差计

直流电位差计是测量直流电压或电动势的比较式仪器，即对被测电动势（或电压） E_x 与标准电池的电动势 E_s 进行

比较。当指零仪平衡时，表明 $E_x = E_s$ ，这时没有电流输出，也没有从电位差计得到电流。所以，采用电位差计测量电压时，没有改变被测量的原有状态，这是指示仪表所无法达到的，因此它准确度高、稳定性好、具有广泛的使用价值。

3.2 直流电桥

直流电桥是测量直流电阻或与直流电阻有一定函数关系的量的比较式仪器，它根据被测量与已知量在桥式线路上进行比较，并用检流计检测其差值，调节已知量直至差值为零，使两个量的作用相抵消而得到测量结果。利用直流电桥可以获得高度准确的测量结果。

根据线路的不同，直流电桥可有两种基本型式：单电桥和双电桥。前者适用于测量中值和高值电阻，而后者适用于测量低值电阻。为专门用途而设计的特殊电桥有史密斯测温电桥、万能比例臂电桥、比较电桥、三次平衡双电桥和四跨线电桥等。

4 扩大量程装置

扩大量程装置一般是用于实现测量量大小变换的装置。这类装置本身不能完成测量，它必须与其他测量仪器仪表配合使用，以测量超出仪器仪表量程或工作条件的被测量。

在低压电器试验中，应用最多的扩大量程装置有仪用互感器和分流器等。

4.1 仪用互感器

仪用互感器是按一定的比例和准确度变换电压和电流大小的仪器。通常把实验室测量用的或作计量标准用的、准确度等级在0.2级及以上的互感器称为仪用互感器。仪用互感器的结构原理与变压器基本相似,主要由铁心、一次绕组和二次绕组组成,通常被用于变换交流电压或电流。其中变换电压的叫测量用电压互感器;变换电流的叫测量用电流互感器。与电力系统互感器比较,其主要特点是准确度高。

仪用互感器的主要用途是:

- (1) 在精密电测量中,用来扩大测量仪表的量程。
- (2) 在电工仪表检定中利用仪用互感器,可使标准表一表多用。
- (3) 作为标准,检定低准确度的互感器。
- (4) 与高压线路隔离,使测量仪表与被测电路绝缘,保证测量仪表和操作人员的安全。

高准确度的电压、电流比例标准(如电流比较仪等)或部件,在精密电测量和自动控制中,得到越来越广泛的应用。

仪用互感器按适用的频率范围可分为工频、音频和直流互感器。本节只介绍工频仪用互感器和互感器校验仪的有关问题。

4.1.1 测量用电压互感器

测量用电压互感器是用于变换交流电压的互感器,在精密电测量中,常用作扩大电压表等测量仪表的量程。

在正常工作条件及正确连接时,电压互感器二次电压基本上与一次电压成正比,并且相位反转 180° 。

测量用电压互感器在使用中,一次绕组并联接入被测线路,如图5.7-3所示。

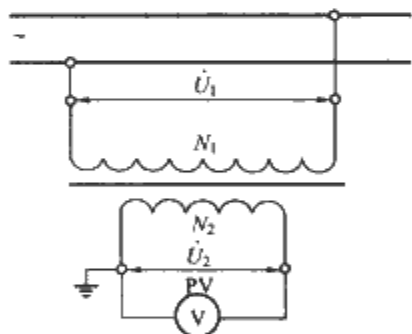


图 5.7-3 测量用电压互感器在使用中的接线图

N_1 ——一次绕组; N_2 ——二次绕组; PV——电压表

4.1.1.1 结构

测量用电压互感器主要由铁心、线圈及绝缘构成。

在一闭合铁心上绕有一次和二次绕组,在一、二次绕组及铁心间有主绝缘,这就构成了铁心绕组。铁心绕组的绝缘根据不同的电压等级可制成干式、油浸式、塑料浇注式。除有些塑料浇注互感器不用外壳外,通常铁心绕组装在外壳内,绕组引出线由装在面板上的高、低压端子引出。

(1) 铁心与绕组。

1) 铁心型式有带卷式和迭积式两种。

带卷式:接缝少,材料的磁特性得到充分利用,缩小了铁心尺寸,减轻了铁心质量。

迭积式:接缝多,材料的磁特性未得到充分利用,铁心尺寸增大,质量增加。

铁心材料一般用硅钢片。最大磁通密度一般设计为 $0.8 \sim 1.2 \text{ T}$ 。

2) 绕组型式有环型和筒型两种。

绕组每匝电压一般设计为 $0.8 \sim 2.5 \text{ V}$ 。

绕组导线的选择由电压互感器的二次电压、额定容量及准确度等级决定。例如,二次电压为 100 V ,额定容量为 5 VA ,准确度为0.01级的电压互感器,其绕组漏阻抗应不大于 0.2Ω 。

绕组绕制方法有分段和不分段两种。分段绕制的绕组用串并联的方法变换变比,但绕组各段阻抗不容易相等,造成不同变比时互感器误差的变化;不分段绕制的绕组用抽头的方法变换变比,应注意不同变比时绕组阻抗的匹配,否则将造成不同变比时互感器误差的变化。分段绕组与不分段绕组相比较,分段绕组降低了绕组的层间电压。

(2) 绝缘。绝缘的布置既要考虑满足电压等级的要求,还要注意改善一、二次绕组的耦合情况。

主绝缘:较低电压等级的互感器一般用干式绝缘;较高电压等级的互感器一般用油浸或塑料浇注绝缘。

层间绝缘:高电压互感器的一次绕组匝数很多,应采用较薄的、绝缘性能好的材料,以减小绝缘厚度,从而减小绕组漏抗,便于提高互感器的准确度。

4.1.1.2 工作原理

电压互感器的工作原理与变压器相似,其原理示意图如图5.7-4所示。

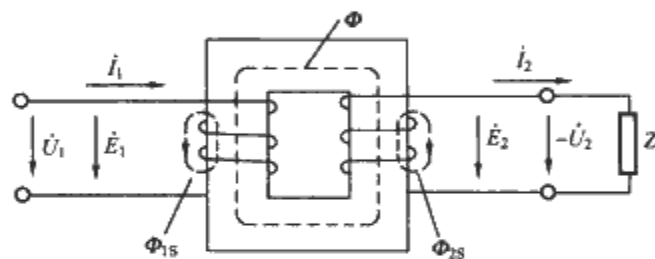


图 5.7-4 电压互感器的原理示意图

电压互感器正常工作时(二次绕组接有仪表),加在一次绕组两端的电压为 \dot{U}_1 ,一、二次绕组中分别有电流 \dot{I}_1 和 \dot{I}_2 流过,在 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 作用下铁心中建立主磁通 Φ 。 Φ 在一、二次绕组中分别感应出电动势 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 , \dot{I}_2 在仪表两端的电压降就是输出电压 \dot{U}_2 。 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 还分别在一、二次绕组中建立漏磁通 Φ_{1s} 、 Φ_{2s} 。电压平衡方程为

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z_2 \end{cases} \quad (5.7-6)$$

其中

$$\begin{cases} E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_{\max} \\ E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_{\max} \end{cases} \quad (5.7-7)$$

则

$$\dot{U}_1 = -\dot{U}_2 + \dot{I}_0 Z_1 - \dot{I}'_2 (Z_1 + Z'_2) \quad (5.7-8)$$

式中: Z_1 为一次绕组漏阻抗; Z'_2 为二次绕组漏阻抗 Z_2 的折算值, $Z'_2 = K^2 Z_2$; f 为频率, $f=50 \text{ Hz}$; N_1 为一次绕组匝数; N_2 为二次绕组匝数; K 为互感器变比, $K = N_1/N_2$; Φ_{\max} 为磁通 Φ 的最大值; \dot{U}'_2 为二次电压 \dot{U}_2 折算值, $\dot{U}'_2 = K \dot{U}_2$; \dot{I}'_2 为二次电流 \dot{I}_2 折算值, $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2/K$; \dot{I}_0 为励磁电流, $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2$ 。

电压互感器等效电路如图5.7-5所示。

电压互感器中 $|\dot{I}_0 Z_1 - \dot{I}'_2 (Z_1 + Z'_2)|$ 比 $|\dot{U}_1|$ 小得多,如忽略不计可得

$$U_1 = \frac{N_1}{N_2} U_2 \quad (5.7-9)$$

可见只要合理选择互感器的匝数比就可以将高电压变为

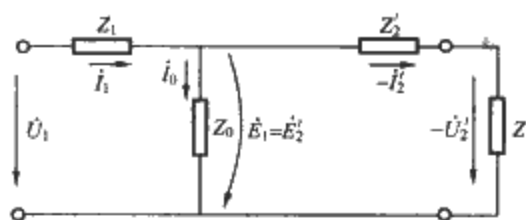


图 5.7-5 电压互感器等效电路图

低电压（反之亦可），使之便于测量。通常二次电压设计为 100V、100/√3V 等。

电压互感器二次绕组所接仪表阻抗较高（负载功率很小）。因此，使用中的电压互感器近似于开路运行的变压器。由于负载功率小，二次端电压很接近二次感应电动势，所以能准确地按比例变换电压大小。这就是电压互感器与变压器的主要不同点。

4.1.1.3 术语及参数

(1) 测量用电压互感器。测量用电压互感器是作为指示仪表、积分仪表和其他类似电器的电源用的电压互感器。

(2) 准确级。准确级是对电压互感器所给定的等级，互感器在规定的使用条件下的误差应在规定的限值内。

(3) 准确级的标称。测量用电压互感器的准确级，以额定电压及该准确级所规定的额定负荷下的最大允许电压误差百分数来标称。

测量用单相电压互感器的标准准确级为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 3.0。

(4) 负荷。二次回路的导纳，用西门子和功率因数（滞后或超前）表示。

注意：负荷通常以视在功率伏安值表示，它是在规定的功率因数和额定二次电压下所汲取的。

(5) 额定负荷。额定负荷是确定互感器准确级所依据的负荷值。

(6) 额定输出。额定输出是在额定二次电压及接有额定负荷的条件下，互感器所供给二次回路的视在功率值（在规定功率因数下以伏安表示）。

(7) 额定电压因数。额定电压因数是额定一次电压值相乘的一个系数，以确定互感器必须满足规定时间内的有关热性能要求并满足有关准确级要求的最高电压。

(8) 额定二次电压。额定二次电压是按互感器使用场合的实际情况来选择的。下列数值是作为接到系统的单相互感器或接到三相系统线间的单相互感器以及作为三相互感器的标准值。

1) 供三相系统线间连接的单相互感器，其额定二次电压标准值为 100V。

2) 欧洲现用的基准值为 100V 和 110V；200V，用于延伸二次回路中。

3) 美国和加拿大现用的基准值为 120V，用于配电系统中；115V，用于输电系统中；230V，用于延伸二次回路中。

4.1.1.4 误差及其特性

(1) 误差。由于绕组有漏抗，铁心有损耗，电流 I_0 在漏阻抗 Z_1 上有电压降 $I_0 Z_1$ ，电流 I_2 在漏阻抗 Z_1 和 Z_2 上有电压降 $I_2'(Z_1 + Z_2)$ ，因而使二次端电压乘以额定变比不等于一次电压，所以互感器在电压变换时有误差。误差公式为

$$\epsilon = \frac{-\dot{U}_2' - \dot{U}_1}{\dot{U}_1} = -\frac{\dot{I}_0 Z_1}{\dot{U}_1} + \frac{\dot{I}_2'(Z_1 + Z_2)}{\dot{U}_1} \quad (5.7-10)$$

电压互感器的误差是个复数，通常用电压误差 f 和相位误差 δ 两个互相垂直的分量表示，即

$$\epsilon = f + j\delta \quad (5.7-11)$$

1) 电压误差（比值差） f 。互感器在测量电压时所出现的误差称为电压误差，它是由于实际电压比不等于额定电压比而造成的。以百分值表示的电压误差为

$$f = \frac{K_N U_n - U_P}{U_P} \times 100\% \quad (5.7-12)$$

式中： K_N 为额定电压比； U_n 为实际一次电压； U_P 为在测量条件下，施加 U_n 时的实际二次电压。

2) 相位误差（相位差） δ 。互感器一次电压相量与二次电压相量的相位之差，称为相位误差。相量方向是以理想互感器中的相位差为零来决定的。

若二次电压相量超前一次电压相量，则相位差为正值；滞后为负值。它通常用 drad （分弧度）或 crad （厘弧度）表示。

电压互感器的相位差 δ 一般很小（ $\tan \delta \approx \delta$ ）。由差电压 $\Delta \dot{U}$ 在垂直 \dot{U}_1 方向上的投影可得相位差的近似公式

$$\delta = \left[\frac{I_0 Z_1 \sin(90^\circ - \theta_0 - \varphi_{k1})}{U_1} - \frac{I_2' Z_1 \sin(\varphi_{k1} - \varphi_2)}{U_1} - \frac{I_2' Z_2 \sin(\varphi_{k2} - \varphi_2)}{U_1} \right] \times 3440 \quad (5.7-13)$$

式中： δ 为相位差，（'）； θ_0 为铁心损耗角； φ_{k1} 为一次绕组漏阻抗（ Z_1 ）角； φ_{k2} 为二次绕组漏阻抗（ Z_2 ）角； $1\text{rad} = 3440'$ 。

(2) 误差特性。在式 (5.7-10) 中误差分为两项，前项为空载误差用 ϵ_0 表示，后项为负载误差用 ϵ_1 表示。

1) 空载误差特性。空载误差特性是描述电压互感器的一次电压 U_1 由 20%~120% 额定电压变化时，空载误差的变化规律。

由式 (5.7-12) 和式 (5.7-13) 可得空载比值差、相位差公式

$$f_0 = -\frac{I_0 Z_1 \cos(90^\circ - \theta_0 - \varphi_{k1})}{U_1} \times 100\% = -\frac{l Z_1 \times 10^8}{2\pi f N_1^2 S} \times \frac{\sin(\theta_0 - \varphi_{k1})}{\mu} \times 100\% \quad (5.7-14)$$

$$\delta_0 = \frac{I_0 Z_1 \sin(90^\circ - \theta_0 - \varphi_{k1})}{U_1} \times 3440 = \frac{l Z_1 \times 10^8}{2\pi f N_1^2 S} \times \frac{\cos(\theta_0 - \varphi_{k1})}{\mu} \times 3440 \quad (5.7-15)$$

式中： l 为铁心平均磁路长度，cm； S 为铁心截面积， cm^2 ； μ 为铁心磁导率。

对一给定的互感器， $l Z_1 \times 10^8 / (2\pi f N_1^2 S)$ 和 φ_{k1} 为常数，随着一次电压 U_1 由 20%~120% 额定电压逐渐增大，铁心的工作磁通密度相应增大。由于铁心磁特性是非线性的（即 μ 、 θ_0 曲线是非线性的），故误差呈非线性变化。误差曲线如图 5.7-6 中实线所示。

2) 负载误差特性。负载误差特性是描述二次负载变化时，负载误差的变化规律。

由式 (5.7-12) 和式 (5.7-13) 可得负载比值差、相位差公式

$$f_1 = -\left[\frac{I_2' Z_1 \cos(\varphi_{k1} - \varphi_2)}{U_1} + \frac{I_2' Z_2 \cos(\varphi_{k2} - \varphi_2)}{U_1} \right] \times 100\% = -AY' \cos(\varphi_2 - \varphi_A) \times 100\% \quad (5.7-16)$$

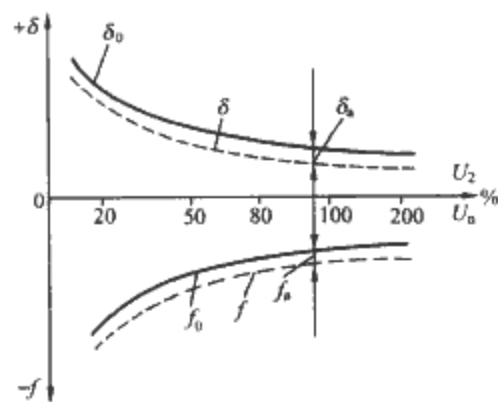


图 5.7-6 电压互感器空载误差曲线

$$\delta_1 = - \left[\frac{I_2' Z_1 \sin(\varphi_{k1} - \varphi_2)}{U_1} + \frac{I_2' Z_2' \sin(\varphi_{k2} - \varphi_2)}{U_1} \right] \times 3440$$
$$= AY' \sin(\varphi_2 - \varphi_A) \times 3440$$
(5.7-17)

式中： $A = [Z_1^2 + Z_2'^2 + 2Z_1 Z_2' \cos(\varphi_{k1} - \varphi_{k2})]^{\frac{1}{2}}$ ；

$$\varphi_A = \arctan \frac{Z_1 \sin \varphi_{k1} + Z_2' \sin \varphi_{k2}}{Z_1 \cos \varphi_{k1} + Z_2' \cos \varphi_{k2}}；$$

Y' 为负载导纳折算值， $Y' = 1/Z'$ ； Z' 为负载阻抗 (Z) 的折算值， $Z' = K^2 Z$ ； φ_{k2} 为二次绕组漏阻抗 (Z_2) 角。

a) 负载阻抗角为定值，阻抗值变化时的情况。对于一给定的电压互感器，一、二次绕组漏阻抗是固定不变的 (Z_1 、 Z_2' 、 φ_{k1} 、 φ_{k2} 为定值)，随着互感器负载的增加 (Y' 增加)，负载误差成正比增大。即

$$f_1 = -A_1 Y' \tag{5.7-18}$$

$$\delta_1 = -A_2 Y' \tag{5.7-19}$$

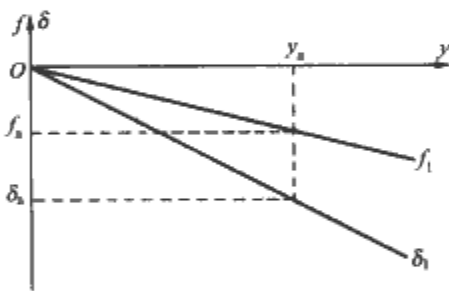


图 5.7-7 负载阻抗角为定值，阻抗值变化时误差曲线

式中： A_1 为常数， $A_1 = A \cos(\varphi_2 - \varphi_A)$ ； A_2 为常数， $A_2 = A \sin(\varphi_2 - \varphi_A)$ 。

当负载为容性时 ($\varphi_2 - \varphi_A$ 为负值)，则误差曲线如图 5.7-7 所示。

对于某一给定的负载 (y_a)，负载误差即为某一定值 (f_a 、 δ_a)，与一次电压 U_1 的变化无关。在此负载下工作时，互感器的误差曲线是它的空载误差曲线的平移 ($f = f_0 + f_a$ 、 $\delta = \delta_0 + \delta_a$)，如图 5.7-6 虚线所示。

b) 负载阻抗值不变，阻抗角 (φ_2) 变化时的情况。由式 (5.7-16) 和式 (5.7-17) 可得

$$\epsilon_1 = (f_1^2 + \delta_1^2)^{\frac{1}{2}} = AY' \tag{5.7-20}$$

可见对一给定的互感器 (A 为常数)，负载导纳决定了负载误差 ϵ_1 的大小。因 Y' 大小不变，所以负载误差 ϵ_1 的大小不变。负载阻抗角 (φ_2) 的变化，使负载误差在比值差、相位差的分配上改变。由式 (5.7-16) 和式 (5.7-17) 可看出负载比值差是阻抗角 (φ_2) 的余弦函数，负载相位差是阻抗角 (φ_2) 的正弦函数。负载阻抗为定值，阻抗角变化时的误差曲线如图 5.7-8 所示。

为了保证互感器的准确度，使互感器的误差不超出允许范围，互感器应在规定的负载和功率因数范围内使用。

电压互感器不适用于测量瞬态电压和冲击过电压。

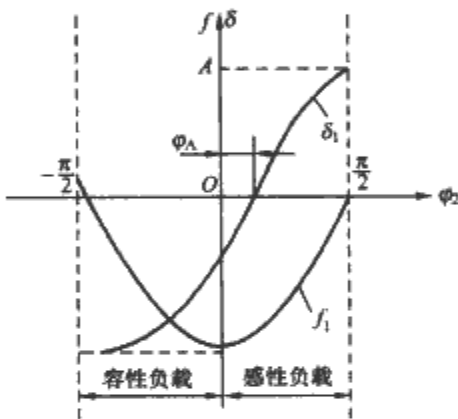


图 5.7-8 负载阻抗值为定值，阻抗角变化时的误差曲线

(3) 准确度等级和允许误差。测量用电电压互感器的准确度等级和允许误差见表 5.7-5。

表 5.7-5 测量用电电压互感器准确度级别和误差限值

准确度级别	比值差						相位差					
	倍率因数	额定电压百分值					倍率因数	额定电压百分值				
		20	50	80	100	120		20	50	80	100	120
1	±%	—	—	1.0	1.0	1.0	± (′)	—	—	40	40	40
0.5	±%	—	—	0.5	0.5	0.5	± (′)	—	—	20	20	20
0.2	±%	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	± (′)	20	15	10	10	10
0.1	±%	0.20	0.15	0.10	0.10	0.10	± (′)	10.0	7.5	5.0	5.0	5.0
0.05	±%	0.100	0.075	0.050	0.050	0.050	± (′)	4	3	2	2	2
0.02	±%	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	± (′)	1.2	0.9	0.6	0.6	0.6
0.01	±%	0.020	0.015	0.010	0.010	0.010	± (′)	0.6	0.45	0.30	0.30	0.30
0.005	±×10 ⁻⁶	100	75	50	50	50	±×10 ⁻⁶ (rad)	100	75	50	50	50
0.002	±×10 ⁻⁶	40	30	20	20	20	±×10 ⁻⁶ (rad)	40	30	20	20	20
0.001	±×10 ⁻⁶	20	15	10	10	10	±×10 ⁻⁶ (rad)	20	15	10	10	10

注 电压互感器的实际误差曲线，不应超过上表所列误差限值连线所形成的折线范围。

4.1.2 测量用电流互感器

在精密电测量中，常用测量用电流互感器扩大电流表等测量仪表的量程。使用中的测量用电流互感器一次绕组 N_1

串联接入被测线路中，二次绕组 N_2 接测量仪表，如图 5.7-9 所示。

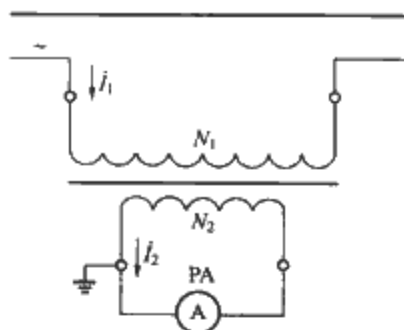


图 5.7-9 测量用电流互感器在使用中的接线图
 N_1 ——一次绕组； N_2 ——二次绕组；PA——电流表

4.1.2.1 结构

测量用电流互感器主要由铁心、一、二次绕组及绝缘构成。

(1) 铁心。铁心一般用铁镍合金或冷轧硅钢带卷制成环形，卷制后均需经过热处理。这种铁心具有接缝少，导磁性能好，便于均匀绕线等优点。利用铁镍合金制成的铁心，最大磁通密度一般设计为 $0.06 \sim 0.15\text{T}$ 。铁心初始磁导率 μ 一般可达 $(2 \sim 8) \times 10^4 \text{ H/m}$ 。

(2) 绕组。一次绕组通常有如下几种形式：按绕组匝数分为多匝式和单匝式；按绕组固定方式分为固定式和无固定式（留有穿心窗孔）。

额定一次电流较大时，多用单匝式一次绕组，导线电流密度一般取 $1 \sim 2.5 \text{ A/mm}^2$ 。固定单匝式一次绕组通常为铜排或铜管；固定多匝式一次绕组一般均匀绕在铁心上。

二次绕组通常均为固定多匝式绕组，亦均匀绕在铁心上。二次绕组阻抗值直接影响互感器的误差，故二次绕组导线截面积一般取得较大。

在多变比的电流互感器中，一、二次绕组可采用抽头式或串并联结构。设计测量用电流互感器最低额定安匝数一般取 600 安匝以上。

(3) 绝缘。低压电流互感器一般用干式绝缘；高压电流互感器的主绝缘一般用油浸或塑料浇注绝缘。

4.1.2.2 工作原理

电流互感器正常工作时，一、二次绕组中分别有电流 I_1 和 I_2 流过。 $I_1 N_1$ 叫一次磁通势， $I_2 N_2$ 叫二次磁通势。根据电磁感应定律，二次磁通势 $I_2 N_2$ 是起去磁作用的。这两个磁通势之差就是电流互感器的励磁磁通势 $I_0 N_1$ ，即

$$I_1 N_1 - I_2 N_2 = I_0 N_1 \quad (5.7-21)$$

其相量方程为

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \quad (5.7-22)$$

励磁磁通势 $I_0 N_1$ 在铁心中建立主磁通 Φ ，则

$$\Phi R_m = I_0 N_1 \quad (5.7-23)$$

式中： R_m 为铁心磁阻。

测量用电流互感器中，励磁磁通势 $I_0 N_1$ 相对于一、二次磁通势是很小的。当忽略 $I_0 N_1$ 不计时，由式 (5.7-20) 可得一、二次磁通势相等，即

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = K_N I_2 \quad (5.7-24)$$

式中： K_N 为电流互感器的额定变比， $K_N = N_2 / N_1$ 。

只要适当选择一、二次绕组匝数比，就可以变换电流的大小。电流互感器等值电路如图 5.7-10 所示。

测量用电流互感器的负载阻抗小，输出功率小，近似于短路运行的变压器。铁心中磁通和励磁磁通势均较小，一、

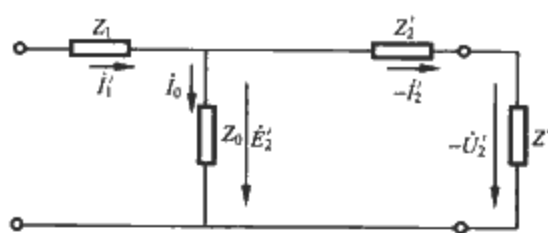


图 5.7-10 电流互感器等值电路

二次电流比近似等于匝数之反比，所以能准确地按比例变换电流，这是电流互感器与变压器的主要不同点。

4.1.2.3 误差及其特性

由于实际测量中，铁心的磁导率不是无穷大，铁心有磁阻，励磁磁通势 $I_0 N_1$ 不等于零，使得二次电流 I_2 与额定变比的乘积不等于一次电流 I_1 ，所以互感器在电流变换时有误差。

电流互感器的误差是个复数，通常用电流误差 f 和相位误差 δ 两个相互垂直的分量表示，即

$$\epsilon = f + j\delta$$

(1) 电流误差（比值差）。电流互感器在测量电流时所出现的误差称为电流误差，它是由于实际电流比与额定电流比不相等造成的。电流误差的百分值用下式表示

$$(K_N I_s - I_P) / I_P \times 100\% \quad (5.7-25)$$

式中： K_N 为额定电流比； I_P 为实际一次电流； I_s 为在测量条件下，通过 I_P 时的实际二次电流。

(2) 相位误差（相位差）。一次电流与二次电流相量的相位之差称为相位误差。相量方向是以理想互感器中的相位差为零来决定的。若二次电流相量超前一次电流相量时，相位差作为正值。它通常用 drad （分弧度）或 crad （厘弧度）表示。

上述误差是由励磁磁通势 $I_0 N_1$ 引起的，叫励磁误差。励磁误差与铁心的磁导率 μ 、截面积 S 、平均磁路长度 l 有关；还与二次回路总阻抗 Z_2 及一、二次绕组的匝数有关。励磁误差是电流互感器的基本误差，除此之外，测量用电流互感器还存在由泄漏电流和漏磁通引起的附加误差。

(3) 误差特性。

1) 一次电流变化时的误差特性。假定二次回路所接仪表不变（负载阻抗为定值），当一次电流由额定值的 $10\% \sim 120\%$ 变化时，磁通 Φ 近似成正比增大，铁心磁导率 μ 增大，比值差 f 和相位差 δ 均减小。 δ 减小得快些，而 f 减小较慢。

2) 负载变化时的误差特性。负载阻抗值增大时，磁通 Φ 近似成正比增大，在额定负载范围内，铁心磁导率 μ 增大，比值差 f 和相位差 δ 均随负载阻抗值的增大而增大， f 的增长比 δ 快些。如果负载阻抗值增大到超过额定值很多倍时，会造成铁心磁通密度过高，铁心磁导率 μ 减小，误差急剧增大。

负载阻抗角变化时，比值差 f 是负载阻抗角的正弦函数，相位差 δ 是负载阻抗角的余弦函数。

为了保证准确度，电流互感器应在额定负载和功率因数范围内使用。电流互感器不适用于测量瞬态交流电流或冲击电流。

4.1.2.4 准确度等级和允许误差

在额定频率、额定功率因数及二次负载为额定负载的 $25\% \sim 100\%$ 之间的任一数值时，电流互感器的电流误差和相位误差应不超过表 5.7-6 所列限值。

表 5.7-6 测量用电流互感器准确度级别和误差限值

准确度级别	比值差					相位差				
	倍率因数	额定电流下的百分数值				倍率因数	额定电流下的百分数值			
		5	20	100	120		5	20	100	120
0.001	$\pm \times 10^{-6}$	20	10	10	10	$\pm \times 10^{-6} \text{ (rad)}$	20	10	10	10
0.002		40	20	20	20		40	20	20	20
0.005		100	50	50	50		100	50	50	50
0.01	$\pm \%$	0.02	0.01	0.01	0.01	$\pm (^{\circ})$	0.6	0.3	0.3	0.3
0.02		0.04	0.02	0.02	0.02		1.2	0.6	0.6	0.6
0.05		0.10	0.05	0.05	0.05		4	2	2	2
0.1		0.4	0.2	0.1	0.1		15	8	5	5
0.2		0.75	0.35	0.2	0.2		30	15	10	10
0.5		1.5	0.75	0.5	0.5		90	45	30	30
1		3.0	1.5	1.0	1.0		180	90	60	60

测量用电流互感器的实际误差曲线应不超过表 5.7-6 中所列允许误差值连线所形成的折线范围。

4.1.2.5 测量用电流互感器的正常工作条件

使互感器测量误差不超过表 5.7-6 中规定允许误差值的正常工作条件如下：

- (1) 互感器的工作频率为额定频率。
- (2) 互感器的负载为额定功率因数（一般可选用 $\cos\varphi=0.8\sim 1$ ）及 $1\sim 1/4$ 倍额定负载（适用于额定二次电流为5A）时下限不得低于 0.1Ω 。
- (3) 互感器的环境温度为 $0\sim 40^{\circ}\text{C}$ ；相对湿度不大于80%。

在电器试验中，常用的测量用电流互感器的额定输出功率为5VA或10VA。在选用互感器和仪表时，应使电流表、功率表和相位表的内阻抗与互感器的额定输出功率、额定功率因数相匹配。互感器的变比也应选择适当，被测电流与互感器额定一次电流之比的推荐选用范围为50%~120%。当该百分比值为50%时，对于0.2级测量用电流互感器其电流误差不大于0.3%，相位误差不大于 $15'$ 。如将选用范围取在80%~120%，则测量误差还可减小。

4.1.2.6 测量用电流互感器的连接

电流互感器的一次绕组应与被测电流回路串联连接，在二次绕组两输出端之间接入电流表或其他仪表。在一次绕组通电，二次绕组不接仪表的情况下，应将二次绕组的两输出端短路，而不应开路。

互感器连接时，应注意一次绕组和二次绕组的极性标示，使输出量与输入量相位相同而不是相位相反。

4.2 分流器

分流器是为扩大仪表测量电流的范围而与仪表并联的电阻。

分流器有两对接线端，一对是电流接线端，另一对是电位接线端。电流接线端与被测电流回路串联；电位接线端与测量线路相连接。

(1) 测量直流电流用分流器。在测量直流大电流时通常用定值分流器与毫伏表配合测得电流值。

在额定电流下分流器电位端之间的额定电压（mV）规定值有30，45，75，100，150，300。其中常用的是75mV或45mV。与准确度等级为0.5级的直流毫伏表相配套的定值分流器其准确度等级应为0.2级。

分流器电阻值的基本误差以额定电阻值的百分比表示，允许的基本误差应不大于分流器的准确度等级指数。环境温度自标准温度 20°C 每改变 10°C 所引起的误差改变应不超过50%。

(2) 低感分流器。低感分流器是具有低电感值且基本上是纯电阻参数的分流器。其主要用途是测量瞬态大电流或冲击大电流值。在电器试验中，它通常是与记录仪器配套使用。

为了准确地记录含直流分量或谐波分量的工频电流以及不规则的电弧电流，一般低感分流器的时间常数 T 应不大于 $20\mu\text{s}$ 。

低感分流器有薄片对折式和同轴双筒式两种结构形式，如图5.7-11所示。一般最大工作电流为10kA及以下低感分流器用薄片对折式结构；10kA以上用双筒式结构。

一般低感分流器的额定输出电压为2~3V，实际使用时应以分流器的电阻值为准进行被测电流的计算。常用的低感分流器的准确度等级为0.2级或0.5级。

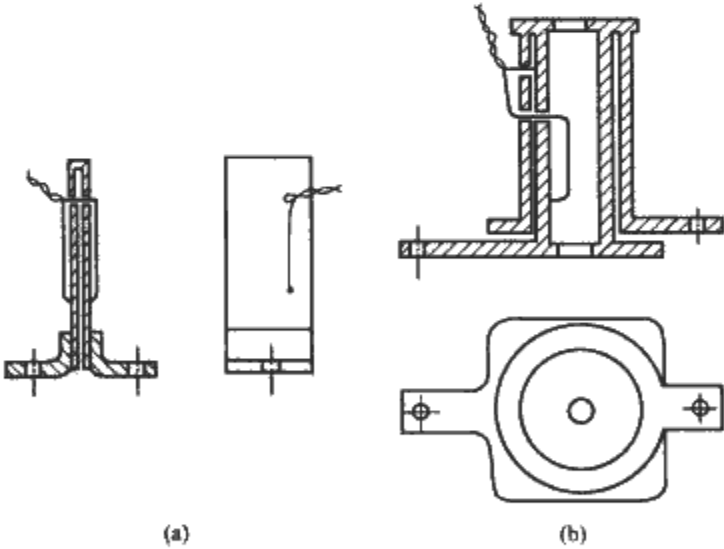


图 5.7-11 低感分流器
(a) 薄片对折式；(b) 同轴双筒式

5 记录仪器

5.1 光线示波器

光线示波器是采用电磁作用原理，利用处于磁场中的振动物偏转反射的光点，在感光记录纸上直接或经处理后呈现一个或多个瞬时值的光点，以感光的方式达到测量记录的一种记录仪器。

光线示波器与其他记录仪器比较,具有以下特点:

(1) 光线示波器的测量机构振动子固有频率达 15kHz,可以记录 10kHz 以下的变化信号。

(2) 通过采用光程长度放大,增大记录幅度,不仅提高测量机构灵敏度,线性度也相应提高。

(3) 测量机构振动子一般做的很小,可实现几个或几十个以下的信号同时记录,亦可实现交叉记录。

光线示波器存在的不足之处:

1) 多信号测量记录后,数据分析、处理比较费时。

2) 感光记录纸有效期短,不宜保存,价格贵,显、定影麻烦。

在低压电器试验中,光线示波器用来记录电压、电流等试验参数的波形;进而测量电压和电流的有效值、峰值、瞬时值,功率因数,时间常数,时间间隔以及焦耳积分等量值。

5.1.1 光线示波器的基本原理

光线示波器的光学系统图如图 5.7-12 所示。当输入电信号时,处于恒磁场中的磁电系振动子绕组有电流流过,因而使动框(绕组)绕张丝形成轴转动,贴在张丝上的反射镜也随之偏转,反射的光线就在移动的感光记录纸上描绘一波形,从而得到被测信号的记录数据。

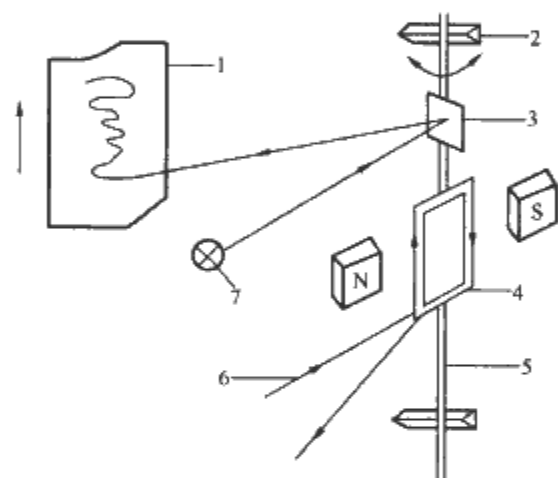


图 5.7-12 光线示波器光学系统图

1—记录纸; 2—支承; 3—反射镜; 4—绕组;
5—张丝; 6—输入信号; 7—光源

5.1.2 光线示波器的主要组成

光线示波器一般由磁系统、振动子、机构传动系统、光学系统、电系统、时间标志和摄影机构等部分组成。其中振动子是光线示波器的关键部件,主要有回线式、动圈式和动磁式三种。

(1) 回线式振动子。回线式振动子固有频率较高,但由于磁钢装在振动子中使其外形尺寸大、灵敏度低。FC1 型振动子即属回线式振动子。

(2) 动磁式振动子。动磁式振动子的载流绕组固定,磁钢运动,这种结构的张丝短,受外界振动影响较小,因而耐振。其体积稍大于动圈式,小于回线式,可按需要阻抗绕制,阻抗范围广。FC9 型振动子即属此类型。

(3) 动圈式振动子。动圈式振动子的载流导体和弹性元件分开,这种结构灵敏度高,尺寸小,固有频率范围大,可进行数十线同时测量。

5.1.3 光线示波器的使用

使用光线示波器时应按照使用说明书进行操作和调试。结合低压电器试验的特点,现补充说明如下。

(1) 振子的选用。选择振子应根据被测量的频率范围和信号大小选定有适当工作频率和灵敏度的振子。

在低压电器试验中,推荐选用固有频率为 1200Hz (工作频率 0~500Hz) 或 2500Hz (工作频率 0~1000Hz) 的振子记录电压、电流波形。这是因为选用固有频率低的振子,测量频率响应低,不能较真实地记录瞬态信号。另一方面,由于固有频率越高的振子灵敏度越低,选用频率更高的振子需要更大的振子电流,电流振子受分流器输出电压的限制,在振子灵敏度低的情况下,示波图波形高度可能达不到观测要求;对于电压振子,提高振子电流可能导致测量电路的电阻达不到按工频恢复电压每伏至少为 100Ω 的要求。

(2) 振子的安全使用。由于光线示波器的各振子均插入公共的磁系统(永久磁铁),振子的电气间隙和爬电距离都很小,因此使用时应使振子的对地电压在安全电压范围内。在电器的通断能力试验中,通常将低感分流器一端接地,使电流振子对地电压很低。为降低电压振子的对地电压,在试验电路中应将振子接在对地电位较低处。

在单相通断能力试验电路中,电流振子和电压振子可按图 5.7-13 连接,这样电压振子在电路中均接在近接地点处;如将 R_{11} 与 R_{12} 并 R_{13} 位置对调或将 R_{21} 与 R_{22} 并 R_{23} 位置对调,将使电压振子接在高电位端,此方案不可取。

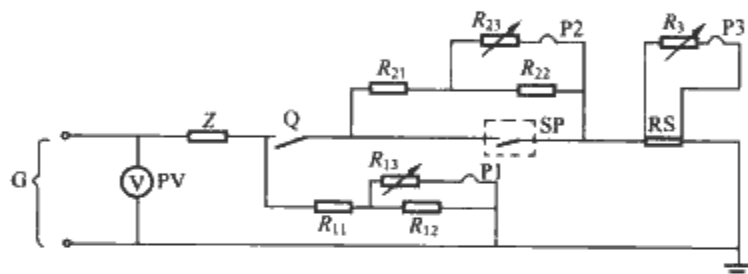


图 5.7-13 单相试验电路中振子的连接

G—电源; PV—电压表; Z—主电路阻抗; Q—接通电器;
SP—被试电器; RS—低感分流器; P1、P2、P3—振子;
 R_{11} 、 R_{12} 、 R_{21} 、 R_{22} —分压电阻;
 R_{13} 、 R_{23} 、 R_3 —可变电阻

在图 5.7-13 中电压振子是从分压电路上取信号,这种连接较振子直接串联在可变电阻电路上(相当于 $R_{12} = R_{22} = \infty$) 更便于示波图波形高度的整定,对振子也更安全。

在三相通断能力试验电路中,为降低电压振子的对地电压,可采用图 5.7-14 所示的桥式电路。图 5.7-14 中的 A1、A2 与被测电压信号相连(如接电源电压或接在开关断开的主触头两端),电压振子接在 A3~A4 桥路上。

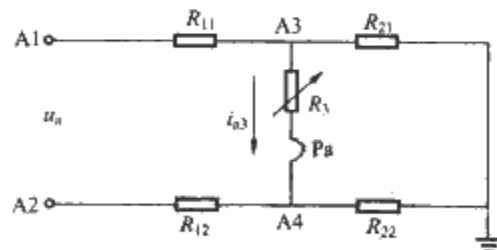


图 5.7-14 电压振子电路的桥式连接

R_{11} 、 R_{12} 、 R_{21} 、 R_{22} —电阻; R_3 —可变电阻; Pa—振子

当 $R_{11} = R_{12} = R_1$, $R_{21} = R_{22} = R_2$, A1 与 A2 间电压为 u_a 时,通过电路计算可以得出

$$i_{a3} = \frac{R_2}{R_1 R_3 + R_2 R_3 + 2 R_1 R_2} u_a \quad (5.7-26)$$

由式(5.7-25)可见,振子电流 i_{a3} 与被测电压 u_a 成正比。 i_{a3} 可以真实地反映 u_a 的变化情况,示波图是可取的。

当试验电路的电源电压为 400V 时,推荐 $R_1/R_2 \geq 9$,并且当 $R_3 \gg R_2$ 时应满足 $R_1 + R_2 > (\text{工频恢复电压}/100\text{V}) \times 10\text{k}\Omega$; 否则,可取 $R_1 + \frac{1}{2} R_2 \geq (\text{工频恢复电压}/$

100V) × 10kΩ。

(3) 振子电路的标定。在拍摄示波图测量大电流时, 按振子说明书给出的直流灵敏度进行交流电流的计算是不可取的。一般是采用比较法计算被测电流。

首先应对电器试验中需要用于定量测量的振子逐个进行标定。标定时的振子电路接线如图 5.7-15 所示。

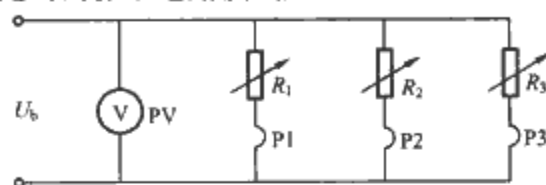


图 5.7-15 标定振子电路接线图

图 5.7-15 中电压表可选用交流数字电压表或数字万用表, 测量准确度应不低于 0.5%。

给定一个标准电压 U_{b1} , 调节电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 使被标定振子 P1、P2、P3 在示波图上对应的各电压标准波其峰—峰高度为同一值 h , 记录 R_1 、 R_2 、 R_3 和 h 值, 求出振子电路的灵敏度

$$S_{u1} = h/U_{b1} \quad (5.7-27)$$

给定第二个标准电压, 重复上述过程。可给定 n 个标准电压, 并记录 n 组数据。

为了简便, 也可只拍摄一次标准波, 然后用换算的方法求得与多个标准电压分别对应的多组数据。

用换算法拍示波图时, 标准电压取值可以高于低感分流器的实际输出电压范围。这样在没有低量程、高准确度交流电压表的情况下, 可用高量程、高准确度交流电压表作基准。

假设拍示波图时的标准电压为 U_{bm} , 把 R_1 、 R_2 、 R_3 分别调节为 $R_1 = R_{1m}$, $R_2 = R_{2m}$, $R_3 = R_{3m}$, 使各振子对应的标准电压波的峰—峰高度均为 h 。为了计算当标准电压为 U_{bx} 时各振子对应的电压标准波的峰—峰高度仍为 h , 应给定的 R_{1x} , R_{2x} , R_{3x} 值可以通过求解方程得出。

为了满足上述假设条件, 在 U_{bm} 和 U_{bx} 两种标准电压下对应的振子电流应相等, 因此

$$\frac{U_{bx}}{R_{1x} + R_{01}} = \frac{U_{bm}}{R_{1m} + R_{01}} \quad (5.7-28)$$

则

$$R_{1x} = \frac{U_{bx}}{U_{bm}} (R_{1m} + R_{01}) - R_{01}$$

同理

$$R_{2x} = \frac{U_{bx}}{U_{bm}} (R_{2m} + R_{02}) - R_{02}$$

$$R_{3x} = \frac{U_{bx}}{U_{bm}} (R_{3m} + R_{03}) - R_{03}$$

以上三式中 R_{01} 、 R_{02} 、 R_{03} 分别为振子 P1、P2、P3 的内阻; R_{1m} 、 R_{2m} 、 R_{3m} 及 R_{1x} 、 R_{2x} 、 R_{3x} 分别为对应标准电压 U_{bm} 及 U_{bx} 的 R_1 、 R_2 、 R_3 值 (如图 5.7-15 所示)。 R_1 、 R_2 、 R_3 应为外接串联电阻与连接线电阻之和。为了提高测量准确度及调节方便, 串联电阻可选用十进位电阻箱。实验室应定期对示波器振子进行标定, 并记录备查。

(4) 瞬态电流的测量。通过示波器拍摄示波图测量瞬态大电流是应用比较法进行计算的。

例如, 在进行通断能力试验时, 选用经过标定的振子测电流。三相电路应选 3 个电流振子, 并分别与可变电阻串联后接在各分流器上。根据试验电流范围, 可确定分流器输出电压的范围, 适当地选定标准电压作比较基准。假定试验电流约为 3kA, 分流器电阻 $R_f = 800\mu\Omega$, 则分流器电压约

2.4V, 可选定 3V 作比较基准。从标定参数记录中查出在标准电压为 3V 时三个振子对应的串联电阻, 试验电路中三个振子的串联电阻 (含接线电阻) 应按标定参数整定。

在通断能力试验前, 通常先拍整定波, 图 5.7-16 所示为一相电流整定波。现以该整定波为例计算电流。



图 5.7-16 电流整定波

1) 计算电流有效值。测量电流有效值可通过直接测量电流正弦波的峰—峰值经换算得出。高度的测量可选在电流直流分量基本消失的第 3~4 周波位置, 如电流有递减趋势, 则应通过画包络线测量第一周波内上下包络线间距离。

分流器输出电压

$$U_f = \frac{h}{S} \quad (5.7-29)$$

试验电流

$$I_a = \frac{U_f}{R_f} = \frac{h}{SR_f} \quad (5.7-30)$$

式中: U_f 为分流器输出电压; h 为电流波峰—峰高度; S 为振子电路灵敏度; I_a 为试验电流; R_f 为低感分流器电阻。

例如, 图 5.7-16 中 $h = 49.5\text{mm}$, 已知 $S = 20\text{mm/V}$, $R_f = 800\mu\Omega$, 可求得

$$I_a = 3.09\text{kA}$$

2) 计算电流瞬时值。计算 t_1 瞬间的电流瞬时值可先测量在 t_1 瞬间电流波形对零线间高度 h_{d1} , 瞬时电流应为

$$I_{d1} = \frac{2\sqrt{2}h_{d1}}{SR_f}$$

例如, 图 5.7-16 中 $h_{d1} = 31\text{mm}$, 则

$$I_{d1} = 5.48\text{kA}$$

5.1.4 光线示波器的测量误差

用光线示波器进行定量测量, 产生测量误差的因素很多。

(1) 振子非线性误差。通用光线示波器振子为磁电系结构, 其偏转值应与振子电流瞬时值成正比。由于制造上的原因, 振子允许有不大于 $\pm 3\%$ 的非线性误差。在实际测量中一般是用比较法计算被测量值, 测量结果在一定程度上排除了非线性误差。在测量交流正弦波的有效值时, 如拍摄整定波时振子电流与标准波振子电流之比在 $80\% \sim 120\%$ 范围内选择, 可将测量量的非线性误差控制在 $\pm 1.5\%$ 之内。测量瞬时值时, 在瞬时值与标准波峰值相比大得多或小得多的情况下, 非线性误差还是较大的, 可仍按 $\pm 3\%$ 估算。

(2) 振子幅频特性。在测量幅值相同、频率不同的电流时, 振子偏转值随频率变化。如阻尼因数 $\beta = 0.7$ 时, 振子在工作频率范围内, 频率变化造成的误差不大, 如 β 更大或更小都会因频率变化产生不可忽略的误差, 这种误差主要反映在非正弦波量的测量中。

(3) 振子的滞后特性。由于振子活动部分的惯量, 产生了振子偏转值时间上和相位上的滞后 (这种滞后随阻尼因数而变), 导致测量时间、相角和瞬时值的误差。

(4) 人员误差。由于人的视觉分辨能力, 限制了用示波器测量的分辨力。假如试验人员对示波器光点位置的分辨力为 0.5mm , 按示波图波形峰—峰值为 50mm 考虑, 分辨力造成的重复误差为 1% , 加上随机误差的影响, 人员误差估

计在1.5%以下。

(5) 记录误差。记录误差指记录纸在拍摄时的抖动及走纸速度不均造成的误差。

(6) 环境因素造成的误差。低感分流器及振子电路电阻元件和连接导线的电阻值,由于环境温度变化等因素而偏离标定时数值,导致振子电流变化及被测量值的误差。

(7) 振子标定的误差。上述的误差因素对示波器所拍摄的标准波准确度也都有不同程度的影响。此外,标定时所用的电压表的误差也传递给了标准波。为了减小作为示波器测量基准的标准波本身的误差,一方面是提高标定用的电压表的准确度,减小系统误差;另一方面可采取一人重复测量或多人分别测量,用计算平均值的方法确定标定参数,以减小随机误差和人员误差。

5.1.5 光线示波器测量的不确定度

在低压电器试验中,通过对相同的试验参数用示波器测量与用指示仪表和瞬态记录仪等更准确的测量方法进行对比的结果,可以粗略地对不同测量量的测量不确定度评估如下:

(1) 测量大电流等正弦波有效值的不确定度可以控制在 $\pm 3\%$ 以内。

(2) 测量一般工频电流或带有直流分量和高次谐波(主要是3~5次谐波)瞬态电流的瞬时值,随该值反映在示波图上幅值的不同,测量不确定度一般可控制在 $\pm (5\% \sim 10\%)$ 以内;但对于高频信号或尖峰信号,拍摄的示波图可能严重失真,测量值也是不可信的。

(3) 相位测量。以走纸速度为1m/s、测量分辨力为0.5mm计算,50Hz时对相角的分辨力为 6° ,加上其他因素的影响,测量相位差和 $\cos\varphi$ 的误差很大,实践也证明其测量结果不可信。

(4) 时间间隔测量。以走纸速度为1m/s、测量分辨力为0.5mm计算,并考虑不同振子滞后特性的差异,时间间隔的测量不确定度对同一量可控制在0.5ms内,不同量间可控制在1ms内。

5.2 数字存储示波器

数字存储示波器也称数字波形分析仪,它除具有瞬态记录仪的基本功能外,还包含有显示和数据处理部分,有的还将软件固化在仪器内,能够快速采集一系列模拟量的瞬变信号,并转换为相应的数字信号存储起来,然后按需要进行处理。存储器记录的数据可经过D/A(数/模)转换器转换为模拟量与示波器相连,再现输入信号波形。

数字存储示波器的数据采集和存储部分的原理与瞬态记录仪基本相同,其基本参数是采样速率、分辨率、通道数和存储容量。

现代的数字存储示波器具有多种技术指标:

(1) 带宽。带宽有200MHz,100MHz,60MHz三种或更多。

(2) 有2条或4条独立通道,8位垂直分辨率。垂直灵敏度为5~10mV/div(2mV/div时20M带宽限制器自动打开,垂直精确度3%)。

(3) 测量系统。测量系统具有多种自动测量功能,自动测量参数包括周期、频率、正脉冲宽度、负脉冲宽度、上升时间、下降时间、最大值、最小值、峰—峰值、平均值、周期均方根值等,可在线显示四种任意组合的波形测量值。可按百分比或电压值来设置各种阈值,例如,上升沿10%~90%,或者设定为上升沿0.1~0.9V。可选四种参数实时

显示。

(4) 采用峰值检测捕获高频和随机毛刺。在5~50s/div的所有时间分度下,可捕获窄至12ns的毛刺。

(5) 通过输入输出接口可控制和设置示波器进行自动化测量。标准并行端口用于连接打印机。

(6) 触发系统。主要触发方式有自动(支持40ms/div和更慢的滚动模式)、正常、单序列。触发源有任意通道、外触发通道、外触发通道/5、市电;触发显示可以显示触发电平,预览触发源的频率情况。

(7) 光标。光标分水平光标(电压)、垂直光标(时间),可以测量 ΔT (时间)、 $1/\Delta T$ (频率)和 ΔV 等参数值。

(8) 时基系统。水平缩放可水平放大或缩小静态或动态的波形,可以使用视窗选择特定的区域进行视窗扩展方式放大观察。时间/分度范围为5ns/div~50s/div;记录长度为2500点;时基精度为 50×10^{-6} 。

(9) 数学运算功能。有加、减运算,标准配置增加FFT算法。

(10) 使用菜单模式,可以把在“Auto Set”模式下捕获的波形分成三类:方波、正弦波、视频信号,并可以在菜单中直接选择期望观察的角度。

数字存储示波器可以在数字、模拟电路设计,电力、电子产品制造、测试及维护,电力、电子产品的品质控制,技术服务和维修等领域广泛应用。

6 其他仪器仪表

低压电器测试中还会应用到其他仪器仪表。

6.1 频率谐波分析仪

频率谐波分析仪是市场上最为通用和易于使用的电能质量测试设备。在单相和三相电能系统中,可进行四种可编程测量和电能质量分析。瞬时读取测量结果,包括数据列表、柱形图和单独波形,便于分析工作现场的数据。带有实时时钟和1MB内存,电能分析仪存储的数据可上传至个人计算机,用PowerVision软件深入分析。

能量与谐波分析程序是理想电能分析仪的标准配置。分别提供扰动、检查仪表、快速检查程序。这些程序可使用户用单一设备检测电能质量的其他方面。

频率谐波分析仪具有以下主要功能:

(1) 真有效值测量、单相及三相测量。

(2) 数据存储(1MB内存)。

(3) 4个电压通道、3个电流通道。

(4) 自动设置量程、记录最大/最小值。

(5) 能量与谐波分析程序。

(6) PowerVision分析软件。

(7) 可选程序:

1) 扰动。

2) 检查仪表。

3) 快速检查。

(8) 密码保护屏幕设置、160×160点阵液晶。

(9) 用户数据采集、实时时钟。

(10) 可编程触发点与触发时间。

(11) 自动关闭屏幕显示。

6.2 多功能钳形功率表

1. 性能及特点

(1) 电流/电压的真有效值、峰值、波峰因数、谐波总

量和频率的测量。

- (2) 功率、视在功率、无功功率、电能、功率因数、波形失真的测量。
- (3) 均载三相功率的测量。
- (4) 有效谐波的分析与显示。
- (5) 纹波的测量。
- (6) 灵活存储、同步收集所有的谐波及相关波形。
- (7) 大屏幕示波器以波形、数表的方式显示各种参数。
- (8) 8 个数据存储器能进行最大、最小及平均值的记录。

(9) 扩展存储器，可采集多达 5000 个读数。

(10) 连接 PC 机，通过 WinLog 软件采集谐波数据。

(11) 遵循 IEC1010 Cat IV 标准的设计，保证危险电压下的工作安全。

2. 应用领域

可广泛应用于电信系统及电力系统的动力、控制、供暖通风、空调制冷、调整电动机、照明设备及电气工程师进行 AC/DC 各种现场测试。了解电力的质量、谐波、功率因数及汽、柴油发电机组供电状况等。

表 5.8-2 冲击变压器分接开关位置与输出电压对应表

分接开关挡位	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
输出电压与额定电压比值 (%)	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25

5) 很小的内阻抗。为了增大变压器的出力，避免变压器占用和消耗电源容量，希望变压器短路阻抗压降小，一般应不大于 4%。同时，为了满足试验的要求，其功率因数应不大于 0.3。

变压器自身阻抗值的计算公式为

$$Z_T = \frac{U_T(\%) }{100} \frac{U_N^2}{S_N} \quad (5.8-1)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (5.8-2)$$

$$R_T = \frac{\Delta P_T}{3I_N^2} \times 10^{-3} = \frac{\Delta P_T U_N^2}{S_N^2} \times 10^{-3} \quad (5.8-3)$$

式中： Z_T 为变压器阻抗， Ω ； U_T (%) 为变压器阻抗电压百分值； U_N 为额定线电压，kV； S_N 为变压器额定容量，MVA； X_T 为变压器电抗， Ω ； R_T 为变压器电阻， Ω ； ΔP_T 为变压器短路损耗，kW； I_N 为额定电流，kA。

6) 较高的自然频率。为了满足分断试验时对瞬态恢复电压波形调节的需要，希望变压器自身固有频率应尽可能高。

(2) 冲击变压器的结构形式。

1) 三相式。三相式冲击变压器的三相绕组共用铁心，固装在同一外壳里。由于三相绕组组成一个整体，因而其体积较大。

2) 单相式。将三相分离开，各做成一个单相变压器，再在外接线上将其接成三相运行，在保证总容量基础上，可使单台体积重量减小，有利于制造、运输和安装。当然，其总重量、体积、占地都相应增大。

3) 自耦式。在低压电器试验中，在需要短路容量不大的场合，为了使几种电压能同时存在并进行试验，常将低压电源转换成多种低压电源并存的自耦式多抽头变压器。此种变压器的一次侧由大容量的电力变压器的低压侧供电，供电电压为 380V，而二次绕组为多抽头式，按需要可设置有 110V、220V、230V、420V、660V 等多种电压等级抽头。自耦式变压器在小容量电器通断和电寿命试验中也是常用的电源变压器。

在小容量电器试验中，为了克服大容量冲击变压器二次侧只能输出单一等级电压（指同时输出）的缺点，在一次侧仍采用高压供电的情况下，将二次绕组做成多线圈绕组或单线圈多抽头绕组。这样，二次侧的几个线圈（抽头）可同时输出不同等级的电压，供不同的试验选用，有效地利用了时间和空间，提高了使用效率。

1.1.3 大电流变压器和多磁路变压器

在低压电器的短时耐受电流能力、温升及电流特性等试验中，当对电源电压没有特殊要求时，常采用低压大电流变压器和多磁路变压器来为试验提供一个大电流电源，以减小对供电电源容量的要求。

(1) 大电流变压器。大电流变压器多为干式变压器，有三相和单相之分。为了便于对各相电流进行单独调整，多采用单相变压器组合使用。

大电流变压器一般使用于温升试验和电流特性试验中，作为电源设备。在其电源端装设调压器后可调节输出电流。

大电流变压器二次绕组采用扁铜线或铜排制成，一般做成两个以上相同结构的绕组，通过不同的联结组合，可以使

二次侧输出不同等级的电压和电流，以适应不同阻抗和不同电流的试验需要。其典型结构为二次侧四绕组型式，该联结方式和输出的关系见表 5.8-3。

表 5.8-3 二次侧为四绕组的单相大电流变压器联结方式与输出对应表

二次侧绕组联结方式	四路并联	两串两并	四路串联
输出电压	U_N	$2U_N$	$4U_N$
输出电流	$4I_N$	$2I_N$	I_N

注 U_N —单个绕组额定电压； I_N —单个绕组额定电流。

(2) 多磁路变压器。多磁路变压器是一种提供低电压可调节大电流的电源设备，主要用于试验电流较大而对电压不作要求的短时耐受电流能力、过电流脱扣器脱扣等试验。

在使用调压器与大电流变压器的组合来进行输出电流调节时，由于单相接触式调压器容量不可能做得很大，而感应调压器又会引起区域性波形失真，这样就限制了输出容量的提高。为了解决这个矛盾，专门设计制造了多磁路变压器。

下面以四磁路变压器为例来简述多磁路变压器的工作原理。四磁路变压器的原理和接线如图 5.8-1 所示。多磁路变压器是一个单相变压器，它是利用小容量的调节绕组来分段调节大容量输出电流的一个特殊变压器。

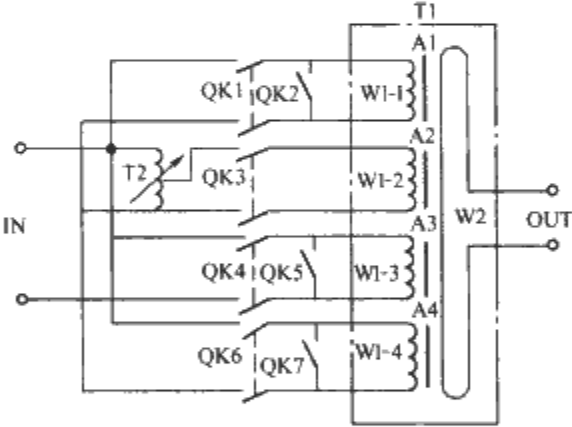


图 5.8-1 四磁路变压器原理和接线图

T1—四磁路变压器；T2—单相调压器；QK1~QK7—换接开关；W1-1~W1-4——一次绕组；A1~A4——组成四磁路变压器的四个独立铁心；W2—二次绕组

从图 5.8-1 可看出，变压器有 4 个独立的铁心和磁路，每个磁路有一个独立的一次绕组。其中 W1-2 绕组为固定接入调压器 T2 的调节绕组。二次绕组同时穿过 4 组铁心，是共磁路绕组。当一次绕组以不同的组合接入电源或短路时，在二次绕组中会有不同的感应电压产生，输出电压即是一次绕组 W1-1~W1-4 在二次绕组 W2 中感应电动势综合作用的结果。当绕组 W1-2 接至电源时，向负载提供相当于或小于多磁路变压器全容量 1/6 的调节电源。W1-1、W1-3 和 W1-4 通过各处的换接开关可以接至电源，或者短路。W1-3 接至电源可向负载提供 1/6 容量的电源；W1-1 和 W1-4 接至电源可分别向负载提供 1/3 容量的电源。电压与电流的调节是通过对换接开关 QK1~QK7 的控制进行粗调，通过对调压器的控制，对二次绕组 W2 中的电压在一定的电压段范围进行调节，进而也调节了输出回路中的负载电流。其开关位置和输出电压间的关系见表 5.8-4。

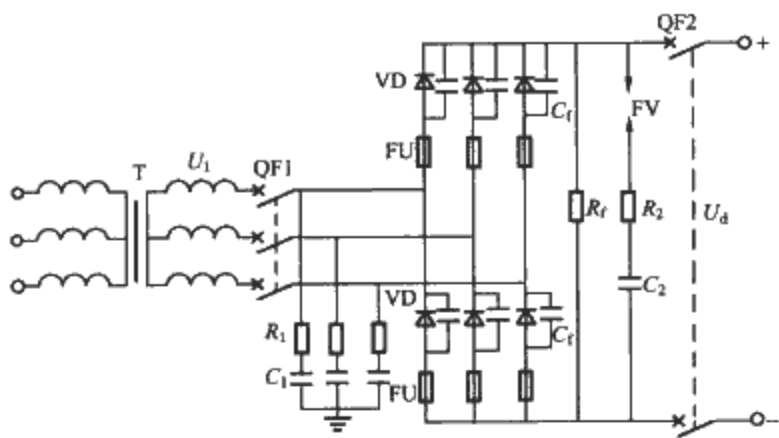


图 5.8-3 三相桥式整流电路

T—整流变压器；QF1—交流侧保护开关；FU—快速熔断器；
VD—硅整流二极管；C₁—换向电容；R₁—直流侧
并联电阻；FV—击穿保险器；R₁、R₂—保护用电阻；
C₁、C₂—保护用电容；QF2—直流侧保护开关

电路处于空载状态，电容充电后无放电回路。但是，当电路接通负载后，由于电容 C₁ 所储的电有限，经过很短时间空载电压的平均值立即从 U_{dm} 降至 U_d，故对试验要求来说，U_d 才是真实的空载电压。为了消除这虚假电压，可在电路中接入一电阻作负载，即图 5.8-3 中的 R₁。

由于整流桥内部发生短路时，故障电流要比整流桥外电路发生短路时的电流大得多，而整流元件的过载能力较差，当有某个整流元件发生短路时，为了保护其他整流元件，可用保护半导体器件的快速熔断器来保护，即图 5.8-3 中的 FU。

在进行直流通断试验时，试验电流被试品分断的瞬间，也会产生过电压，此过电压对整流二极管可能会造成击穿的现象，因此在电路中用阻容吸收装置再串联一击穿保险器 FV。当过电压超过 FV 的整定值时，FV 被瞬时击穿，这时阻容吸收装置才起作用，抑制过电压以保护整流元件。

图 5.8-3 中 R₁ 和 C₁ 是用于抑制交流侧过电压可能引起整流元件击穿的保护元件。

1.3 其他常用试验电源

1.3.1 稳压电源

稳压电源是小容量低压电器试验中常用的电源装置，广泛应用于电压线圈动作值测定，温升、寿命试验和需要电压稳定的场合。

稳压电源是在输入电压或负载电流发生变化时使输出电压保持稳定的一种电源装置。稳压电源可分为交流稳压电源和直流稳压电源两种。

交流稳压电源波形失真度应小于 5%，直流稳压电源的纹波系数应小于 5%。稳压电源的电压应是可调节的，对输出电压的反应要有快速调整能力，并应有过压和过流保护功能。

稳压电源的典型原理框图如图 5.8-4 所示。

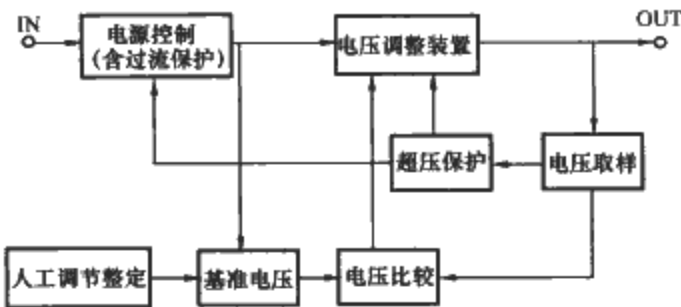


图 5.8-4 稳压电源典型原理框图

1.3.2 稳流电源

稳流电源广泛应用于触头温升、电流特性、接触失效及电阻测定等试验项目。

稳流电源是在电源电压或负载发生变化时使输出电流保持稳定的一种电源装置，也称为恒流源。稳流电源可分为交流稳流电源和直流稳流电源两类。

稳流电源一般也是通过调整输出电压来调节输出电流使其稳定的，它的原理框图与稳压电源类似，不同的是其取样信号是电流取样。

1.3.3 稳频电源

在某些动作特性与电源频率有直接关系的试验中，为了避免电源频率的波动而引起试品（如分频式时间继电器）特性的变化，常采用稳频电源作为供电装置。

稳频电源是一个频率不受电网频率波动影响、相对稳定的电源，它的输出频率应可以调节。稳频电源可分为静止电源和变频发电机组两种。静止电源是利用电网电源经整流、变换、稳频后输出一个频率稳定的正弦交流电。

2 负载阻抗

负载阻抗装置是低压电器试验中用以调节电路参数的装置，它有电阻型、电抗型、电容型或组合型，以便适应不同产品的需要。

在接通和分断能力、短时耐受电流能力、与短路保护电器的协调配合、电寿命等试验及其他需要调节试验电流和功率因数（对直流为时间常数）的试验中，可通过调节电路的负载阻抗来满足各种试验电流和电路特性的要求。负载阻抗由可调电阻器和可调电抗器串联组成，在试验过程中可把它接在冲击变压器的高压侧，称为高压负载阻抗；也可接在冲击变压器的低压侧，则称为低压负载阻抗。此时负载阻抗为模拟各种试验的情况，可接在试品的进线端，也可接在试品的出线端。

(1) 电阻负载。在小容量试验中，常选用金属膜电阻、线绕电阻、被釉电阻、磁盘电阻等；在大容量试验中，常选用生铁电阻、铜合金电阻等。

(2) 电抗负载。电抗器由铜线绕制而成，又可分为有铁心和空心两种，直流试验中多用铁心电抗。

(3) 电容负载。电容负载一般直接采用电力移相电容和补偿电容组成。

(4) 阻抗负载。阻抗负载一般由电阻和电抗组合成套使用。负载阻抗的调节方法可用十进位法和串并联叠加法。常用交、直流负载阻抗参数见表 5.8-5～表 5.8-7。

表 5.8-5 交流负载阻抗装置参数表

型号规格	电源频率 (Hz)	额定电压 (kV)	工作电流	最大工作 电流(kA)	电感(mH)		电阻(Ω)	
					调节范围	最小细度	调节范围	最小细度
L ₁ -50/0.4 R	50	0.42~ 0.72	25~50kA	60	(1.8~27)×10 ⁻³	1.8×10 ⁻³	(0.24~36)×10 ⁻³	0.24×10 ⁻³
L ₁ -25/0.4 R			2.5~25kA	30	(3.17~325)×10 ⁻³	3.5×10 ⁻³	(0.68~68)×10 ⁻³	0.68×10 ⁻³

续表

型号规格	电源频率 (Hz)	额定电压 (kV)	工作电流	最大工作 电流(kA)	电感(mH)		电阻(Ω)	
					调节范围	最小细度	调节范围	最小细度
L ₁ -2.5/0.4 R	50	0.42~ 0.72	60~2500A	3	0.025~12.2	0.025	(7.8~2700)×10 ⁻³	7.8×10 ⁻³
L ₁ -0.1/0.4 R			1~100A	0.12	0.5~750	0.5	0.2~76	0.2
L ₂ -0.8/0.4 R			30~800A	0.9	0.11~32.36	0.11	(0.028~6.655)×10 ⁻³	28×10 ⁻³
L ₅ -10/0.38 R		0.38	0.24~10A	0.012	1~5000	5	1~999	1
L ₅ -15/0.38 R			2.4~15A	0.018	1~5000	1	0.1~990	0.1

表 5.8-6 直流负载阻抗装置参数表

型号规格	时间常数 T _{0.95} (ms)	额定电压 (V)	工作电流 (A)	电感 (mH)		电阻 (Ω)	
				调节范围	最小细度	调节范围	最小细度
DCLR-10A	300	220~660	0.1~10	(0.1~625) ×10 ³	0.1×10 ³	1~6600	1
DCLR-5kA		220~1650	200~5000	3.5~220	—	0.3~9	10×10 ⁻³
R ¹¹⁶ ₁₅₀₀ A		28~30	30~116 75~1500	—	—	0.24~0.91	—
R-100A/220V		220	1~124	—	—	并联叠加	—
R-250A/220V		220	1~250	—	—	并联叠加	—

表 5.8-7 交流高压阻抗装置

型号规格	额定电压 (kV)	工作电流 (A)	电感调节范围 (mH)	电阻调节范围 (Ω)
L ₂ -2/10 R	10	500~2000	0.05~38.4	0.02~2.5
L ₁ -1.5/3.5 R	35	300~1500	0.94~160	1.5~45

当采用电网和冲击变压器作为试验电源时，电路中除了负载阻抗中的电阻 R_1 和电抗 X_1 外，还存在以下的电阻和电抗：

- 1) 试验电路中连接导线的电阻 R_d 和电抗 X_d 。
 - 2) 冲击变压器的内阻 R_T 和内电抗 X_T （高压侧内阻抗应换算至低压侧）。
 - 3) 电网的电阻 R_g 和电抗 X_g 。
- 因此，试验中实际试验电流和功率因数的表示式为

$$I = \frac{\frac{U}{\sqrt{3}}}{\sqrt{(X_1 + X_d + X_T + X_g)^2 + (R_1 + R_d + R_T + R_g)^2}}$$

(5.8-5)

$$\cos \varphi = \frac{R_1 + R_d + R_T + R_g}{\sqrt{(X_1 + X_d + X_T + X_g)^2 + (R_1 + R_d + R_T + R_g)^2}}$$

(5.8-6)

式中： U 为变压器低压侧空载线电压。

上面两式中，除了负载电阻 R_1 和负载电抗 X_1 可以调节外，其他参数在实验室中都为已知值。若改变负载参数 R_1 和 X_1 ，则可得到一定范围的试验电流值和功率因数 $\cos \varphi$ 值。由于在试验中电流范围很大，从零点几安培到几万安培，所以在设计负载阻抗时为了使用方便、结构简单、成本低及便于维修等，在相同电压时电流上限值和电流下限值之比应不大于 100 倍。可调电抗器和可调电阻器都是由不同的电感元件和电阻元件组成的。目前普遍采用 10 进位制（通常用于 100A 以下负载阻抗）调节负载阻抗，这种进位制调节负载阻抗比较直观，不易搞错，但使用的元件较多。另一

种是 4 进位制（4ⁿ），各元件之间的比值依次为 1：1：1；4：4：4；16：16：16；64：64：64；…它的优点是所用电阻和电抗元件规格少，便于加工制造。

下面介绍一种用 3 进位制（3ⁿ）来编排电阻或电抗的方法，它们中各元件之间的比值依次为 1：1；3：3；9：9；27：27；81：81；…以两只相同数值的元件为一组，当用刀开关作换接时，则一组元件需要使用 3 个刀开关。具体接线方式如图 5.8-5 所示，对电抗可同样采用此方法。

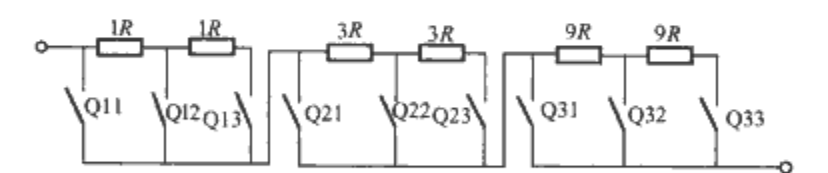


图 5.8-5 按 3 进位制编排的电阻器的接线方法

当使用 8 只元件、12 个刀开关时，电阻变化范围为（0~80） R ；而采用 4 进制时，同样采用 12 个刀开关，使用了 9 只元件，它的电阻变化范围仅为（0~63） R 。当采用 3 进制方法用 15 个刀开关、10 只元件时，电阻范围就可达到（0~243） R 。因此，3 进制方法编排阻抗时更能减少元件，减少接线，便于维修和使用。

负载阻抗中的电阻，可使用无感瓷管电阻和金属膜电阻（在试验中电流很小，例如辅助触头直流通断中）以及工作温度高、温度系数小、电阻系数大的合金材料并按低电感方式绕制而成，以保证电阻元件的固有时间常数甚小和试验中不因通电发热而改变阻值。通常采用铁铬铝合金材料，因为它的最高工作温度可达 1000℃ 以上。

负载阻抗中的电抗器，通常是用铜排或铜带绕在绝缘骨

架上或夹紧在绝缘块上制成。这是一种空心电抗器,它应具有较高的机械强度,以便承受电动力冲击而无松动或变形,并且有一定的电气绝缘强度和热稳定性。另一种是铁心电抗器,此电抗器主要用于控制继电器、辅助触头等类型的直流通断能力试验中。在使用电抗器时,不允许将电感元件用刀开关短接,只允许开路使用。在试验时,为了避免瞬变过程中在两个并联电抗器中产生环流,不允许用 L 及 R 不相等的两个电抗器并联。

3 温升试验及设备

低压电器的温升试验,就是测量低压电器的各特定零部件在规定的工作条件下的温升值,判断温升是否符合要求。“温升”是指电器零部件的工作温度与周围空气温度之差。将温升值加上电器的最高环境温度就是它的最高工作温度,这个最高工作温度不应超过材料的允许极限值。

温度测量仪器和设备有多种类型,如酒精温度计、水银温度计、半导体点温计、气体胀圈式温度计;还有用热敏电阻元件(如铂电阻)、热电偶配合电阻仪、毫伏计等组成的测温 and 控温系统等。在测量电器温升中,除线圈温升采用电阻法之外,大多采用热电偶加毫伏计或自动温升测量设备进行,对于热电偶冷端则采用人工冰点来保持零点或置于空气中。

3.1 电器零部件表面温升的测量及设备

电器的触头、接线端子等零部件的温升试验是测量它们的表面温升,一般采用热电偶法测量,在一定条件下也可采用温度计法测量。

3.1.1 温度计法测量温升

温度计的优点是构造简单、价格便宜;缺点是读数不便、热惯性大且易损坏。最常用的是水银温度计和酒精温度计。

由于温度计须放置在电器部件上,以测量该点的最高温度,因此只能在被测部位有足够大的触及面积且可以紧密接触,同时其温度也不会因温度计的存在而发生明显变化,并且不会损坏电器的外壳或破坏其正常工作位置的情况下使用。

当测量点附近有较强的交变磁场时,应采用酒精温度计。这是因为酒精不受磁场的影响,而水银温度计在交变磁场作用下水银要感应涡流,会引起附加发热造成测量误差。

用温度计测量温度时,为加速被测部件表面与温度计间的热传导,可在温度计的感温球面上包以金属箔(如锡箔或铝箔);并使球面紧贴在部件上,在试验过程中温度计的固定物不应松开。为防止球面上热量的散失,不与被测部件接触的球面应包上油灰或绝热材料(如石棉或毛毡等),以减少测量误差,同时不应使被测部位的散热条件有明显的恶化。此外,温度计与被测部件表面的夹角越小,其间的热阻越小,测量准确度越高,因而规定该角度应不大于 30° 。

3.1.2 热电偶法测量温升

两种不同金属导体 A 和 B 两端连接起来构成闭合回路,这种结构称为热电偶。热电偶具有尺寸小、便于放置、对被测点温升影响小、热惯性小、制造和使用方便等优点,在电器温升试验中广泛用来测量温升。

3.1.2.1 热电偶的测温原理

详细内容见第3章。

3.1.2.2 热电偶的制备和使用

(1) 热电偶的选择。热电偶的测温范围很广,可以测量

高温,也可测量低温。不同材料组成的热电偶,适用的测温范围不同。常用的热电偶有铜—康铜,铂—铂铑,镍铬—镍硅等。铜—康铜在国外已使用,也是我国推荐使用的一种热电特性较好的热电偶材料。这些常用热电偶的测温范围表见前面章节。

(2) 热电偶的制备。电器试验用的热电偶的线径以 $0.2 \sim 0.4 \text{ mm}$ 为宜。要使热电偶特性好,测量误差小,需注意和慎重处理好下列问题:

1) 选材。热电极材料对热电偶的测温性能影响很大,不能任意选取普通漆包铜线和作电阻用的康铜丝制作热电偶,这种热电偶的特性不易保持稳定,必须选取专为热电偶生产的偶丝。

2) 绝缘。在测温电路中,除热电偶测量端之外,各个部分间均要有良好的绝缘,否则会有热电动势损耗而引入误差,或造成热电偶短路而无法测量。铜—康铜热电偶可采用浸漆加塑料套管或直接浸涂有机绝缘材料加以绝缘。

3) 制作。为减少热电偶测温电路受交变磁场感应电动势的影响,应将两根偶丝绞合,一般在 1 m 内绞 100 圈。绞合时,不应使偶丝受到较强的机械应力,以避免导致热电特性变劣,可用人工绕线机缓慢转动进行绞合。绞合后用 500 V 绝缘电阻表检查绝缘是否受损,然后垂直悬挂一段时间,消除应力。

4) 焊接。热电偶制作好后,用电弧焊或锡焊将工作端焊在一起。测量 160°C 以上温度时,必须用电弧焊;低于 160°C 可用锡焊。焊接时应先将焊头清理干净,并绞 $1 \sim 2$ 圈,用电弧焊将焊头焊成球形,其直径约为线径的 $3 \sim 4$ 倍;用锡焊时可将焊头绞 $2 \sim 3$ 圈,焊成圆柱形,长为 $2 \sim 3 \text{ mm}$ 。焊好后,必须使焊头以外的偶丝分开并有良好绝缘,以免影响测量的准确度。

5) 分度。凡用分度误差在 $(0.5 \sim 0.5\%)^\circ\text{C}$ (t 为温度值)的热电极材料制作的热电偶,可以不必重新分度,否则必须重新进行分度。

$0 \sim 200^\circ\text{C}$ 的热电偶一般用精度为 0.1°C 的恒温油槽进行分度, 100°C 以下可采用恒温水槽进行分度。分度前,先将一批热电极材料每筒的头尾取几根,配对制成热电偶,同时进行测试。分度的温度不少于三点(习惯取 100°C 、 150°C 、 200°C 或 50°C 、 100°C 、 150°C)。热端温度用高精度标准温度计(读数误差不大于 0.1°C)确定,冷端保持 0°C ,热电动势用低电动势直流电位差计测量,然后先算出常数 a 、 b 、 c ,再按式(5.8-7)算出分度表,供测温时使用。

$$E = at + bt^2 + ct^3 \quad (5.8-7)$$

式中: E 为温度为 t 时的热电动势, mV ; a 、 b 、 c 为常数; t 为测热电动势 E 时的温度, $^\circ\text{C}$ 。

如分度时所选的三点温度 t_1 、 t_2 、 t_3 分别为 100°C 、 150°C 、 200°C 时,常数 a 、 b 、 c 可用简化式即式(5.8-8)计算。

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{4.5E_1 - 4E_2 + 1.125E_3}{75} \\ b &= \frac{-1.75E_1 + 2E_2 - 0.625E_3}{2.5 \times 10^3} \\ c &= \frac{3E_1 - 4E_2 + 1.5E_3}{1.5 \times 10^5} \end{aligned} \right\} \quad (5.8-8)$$

式中: E_1 、 E_2 、 E_3 分别为在 t_1 、 t_2 、 t_3 温度下测得的热电动势, mV 。

引用这样的分度表,可以提高测量精度,若分度方法正确,其误差一般不超过 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

热电偶使用周期不大于一年,一年后应进行校正。

(3) 热电偶的固定。固定热电偶的工作端时,应使其与被测部件表面之间有良好的热传导性,且尽可能不影响被测处的温升,通常用以下三种方法固定:

1) 钻孔埋入法。先在被测点上钻一小孔,孔的深度和直径略大于热电偶的工作端,然后将焊好的热电偶工作端放入孔中,四周用冲子冲挤固定或用导热性好的材料填充塞紧。

2) 锡焊固定法。用锡将热电偶工作端焊在被测点上,焊点不宜太大,表面要光滑,以盖住热电偶工作端免受气流影响为限。

3) 胶粘固定法。将热电偶工作端焊在厚 0.1~0.2mm 小铜片上,并把被测点与小铜片清理干净,在小铜片上涂薄一层快干胶压在被测点上,待其固化后即可。

为了减少热电偶传导热量引起的测量误差,应尽量使热电偶沿发热体表面敷设一段距离后引出,避免从被测表面垂直引出。

三种固定方法的测温极限、测温误差及其修正方法如下:

目前 502 胶的耐热性较差,极限使用温度在 80~100℃,因此,胶粘固定法的测温范围一般在 80℃以下;锡焊固定法可用在焊锡的软化温度(160℃)以下;钻孔埋入法可用到 200℃以下。锡焊固定法与钻孔埋入法的测温结果十分接近,而 502 胶产生的热阻使胶粘固定法测出的温度偏低,应按式(5.8-9)进行修正

$$t_2 = 1.025t_1 \tag{5.8-9}$$

式中: t_2 为修正后的被测点温度,℃; t_1 为胶粘固定法测出的温度,℃。

(4) 热电偶冷端及补偿。热电偶分度表所对应的自由端温度为 0℃,而测温时热电偶自由端可置于某一固定温度或室温下,因此使用分度表时必须加以补偿。常用的补偿办法有:

1) 计算补偿法。自由端的温度为 t_1 时,查分度表,对应的热电动势为 E_1 。如果测得工作端电动势为 E_2 ,则应按叠加的热电动势 $E_1 + E_2$ 从分度表中查出对应的温度 t , $t - t_1$ 所得值即为被测点的温升。

2) 用冷端补偿器自动补偿。冷端补偿器是一只专用电桥,可以输出一个等于自由端温度的热电动势,将它与工作端热电动势相叠加,就可以根据冷端补偿器的输出直接查对分度表,得出被测点的温度。在 0~40℃ 范围内,冷端补偿器的误差应在 ±1℃ 范围内。

(5) 测量仪表。电器温升试验中,热电偶工作端的热电动势很小,所以测量仪表要灵敏,测量电路基本上无损耗。目前,采用电位差计、毫伏计、数字电压表等进行测量。不论用何种仪表,经校正后,误差应在 ±1℃ 范围内。

3.1.3 温升测量线路及设备

常用的热电偶测温线路有两种:一种是冷端放在空气中,直接把铜丝和康铜丝的两个端头接到电位差计两端;另一种是在热电偶测量线路中再反接串联一个相同的热电偶,并将串接的热电偶冷端置于保温瓶内的冰水混合物中,冰水保持 0℃。

以上为传统的温升试验方法和设备,由于在对不同的热电偶进行热电动势测量时,均由人工完成。存在着劳动强度大、速度慢等缺点,不可避免地降低了测量精度和准确性。

目前,自动温升测量设备已经被推广使用,可以轻松实现检测自动化,同时提高了测量精度和准确性。这里简单介绍自动温升测量设备和人工冰点装置。

(1) 自动温升测量设备。自动温升测量设备将计算机和自动化技术应用于温度测量。温度传感器使用铜—康铜热电偶,可以同时多路(如 100 路)热电偶进行测量,测量采用参考公共油杯的方法。在采集到各测温点的热电动势、参考油杯及环境温度后,就可以计算出某测温点的温升值。自动温升测量设备包括以下几个主要组成部分:热电动势采集(包括多路切换)、计算判断以及系统控制,测量设备的主控部分可采用 PC 机或单片机来完成。自动温升测量设备兼有测量、计算、控制、打印、显示、故障处理多种功能,其系统框图如图 5.8-6 所示。

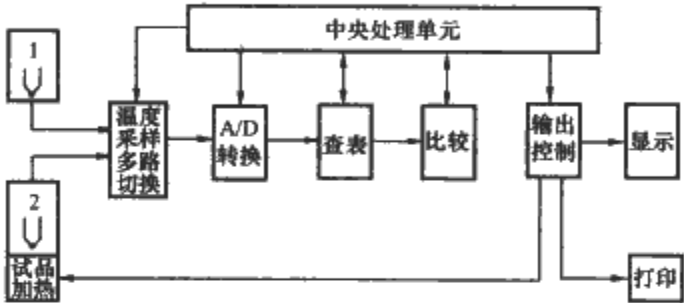


图 5.8-6 自动温升测量设备系统框图

1—环境温度测量用热电偶; 2—试品温度测量用热电偶

环境温度测量用热电偶和试品温度测量用热电偶的温度信号热电动势,通过采样电路,分时采入 A/D 转换器进行模—数变换,查表得出温度值后,将试品温度值同前次采集温度值比较,判别温度是否稳定;再同环境温度比较,得出温升后再同预置温升比较,看是否超限。中央处理单元对整个过程予以有效控制,并将结果显示、打印和对试品加热进行控制。

图 5.8-6 中仅画出测量用的一个热电偶,实际的系统中可以有 30 个以上的温度测量点,并且可扩展到 100 个点以上,毫伏与温度对应表已存入计算机,所以一切工作都由计算机进行,可以实现温度检测的自动化。巡回系统一般都设有超温、断偶报警等功能,为系统的安全可靠运行提供保障。

(2) 人工冰点装置。人工冰点装置是在热电偶使用和校验时提供的一个冷端补偿装置,它能精确而稳定地提供摄氏零度环境,供测试计量使用。过去常将冰块放于一个隔热箱内制成人工冰点装置。这里介绍一种半导体制冷的零度恒温器,其结构原理如图 5.8-7 所示。

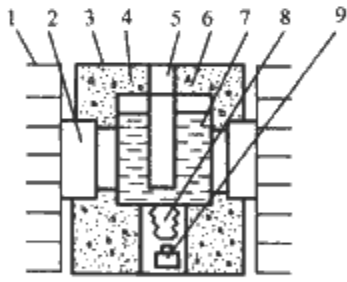


图 5.8-7 半导体零度恒温器结构原理图

半导体电偶制冷器在通电后,内壁制冷使金属冰盒冷却,并使冰盒内纯水变冷而结冰,而使冰室内温度降至 0℃,半导体外壁产生的热量通过散热器经空气冷却向空间散发自冷。在冰室内温度降低的同时,由于冰层作用使冰盒底部波纹膜盒伸展,触动开关,切断电源而停止降温。当冰层逐渐变薄后,波纹膜盒又收缩,使开关复位,又接通电源使半导体电偶重复制冷。如此反复工作使冰室保持 0℃,精度可达 ±0.1℃。

3.2 线圈温升的测量及设备

电器线圈内部的温度分布是不均匀的,它有一个温度最

高点。国家标准规定线圈温升用电阻法测量,测得的是线圈平均温升,故只能间接反映线圈内部发热情况。电阻法的测温原理是利用金属导体的电阻随温度变化的现象。

线圈电阻常用电桥来测量,直流电桥根据结构的不同特点可分为两种:单臂电桥又称惠斯登电桥,适用于测中值电阻($1\sim 10^6\Omega$);双臂电桥又称凯尔文电桥,这种电桥能消除接线电阻和接触电阻对测量的影响,因而适用于测低值电阻(1Ω 以下)。电桥的相关内容见第7章。

线圈电阻也可以通直流电用电压表、电流表测量,即测出线圈两端的电压和通过线圈的电流,用欧姆定律间接计算线圈电阻值。测量时的连接线路有两种,如图5.8-8所示。

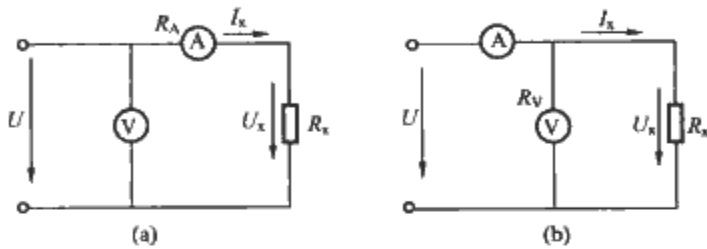


图 5.8-8 用电流表和电压表测量电阻
(a) 线路一; (b) 线路二

在图5.8-8(a)中,电压表所测量的不仅是被测线圈电阻的压降,还包括电流表的压降,因此实际上由仪表读数算出的电阻值为 R_x 与 R_A 之和。在图5.8-8(b)中,电流表所通过的电流不仅是通过被测线圈的电流,还包括通过电压表的电流,因此实际上由仪表读数算出的电阻值为 R_x 与 R_V 的并联值。显然,图5.8-8(a)所示线路适于测量较大的电阻;图5.8-8(b)所示线路适于测量较小的电阻。

用电压表、电流表法测量线圈电阻时,必须考虑上述连接线路,必要时应考虑仪表内阻的影响而予以修正。如线圈电阻很小,在测量线圈压降时,不应将通过试验电流的连接处的接触电阻压降测量进去。为消除接触电阻对测量结果的影响,可用毫伏表表笔直接测量。

在测量冷态电阻时,为保持线圈温度不致升高,线圈电流值一般不超过约定发热电流的15%,并尽可能缩短测量时间。在测量热态电阻时则可用约定发热电流进行测量。

由于各种测量方法和各种仪表都有不同程度的测量误差,线圈的冷态与热态电阻应当用同样方法和同一仪表测量,导线的连接点也应相同。

在测量线圈的冷态电阻以前,为使整个线圈的温度与周围空气温度一致,应将被试电器放在测量室内不少于8h,并须保持周围空气温度的稳定,在测量前1h内室内温度的变化应不大于 3°C 。

线圈的热态电阻应在温升试验结束后立即测量,因此测量准确度与测量速度有很大关系,若不可能立即测量时,则应在分断电源后,经过相等时间间隔用电阻法求出温升冷却曲线,再用外推法确定线圈的稳定温升。第一次热态电阻值必须在切断电源后30s内测出。

4 介电性能试验及设备

介电性能试验是检查电器绝缘结构的绝缘性能,验证其对工作电压、操作过电压及雷击过电压的耐受能力。绝缘材料所能承受电压的能力用电气强度来表示,其值为绝缘材料在击穿时单位厚度所承受的电压值,即击穿电压除以击穿处的绝缘厚度所得的值,单位以 kV/cm 表示。

任何电器产品都离不开绝缘材料,绝缘材料在电器中的作用主要是:保证导电部件之间及导电部分对地之间的绝

缘,保护人员的操作安全。为了保证电器安全可靠地使用,各种电器产品都必须进行绝缘质量的检验。电器的绝缘结构,一方面应能承受长时间交变电压的作用,另一方面还应能承受短时间幅值大的冲击电压的作用。对电器绝缘结构电气强度的考核是通过耐压试验进行的,它包括工频耐受电压和冲击耐受电压试验两种。为了验证产品绝缘介电性能和绝缘配合,常使用工频耐受电压试验设备和冲击耐受电压试验设备。

4.1 工频耐受电压试验及设备

工频耐受电压试验是对电器在正常工作中要求电隔离的部件之间施加一定的高电压,并持续一定的时间,以验证高压下的介质泄漏电流是否超过规定。

采用工频正弦波的较高电压,加至产品有关部位,考核其对该电压的承受能力和电流的泄漏情况。

工频耐受电压试验设备原理框图如图5.8-9所示。

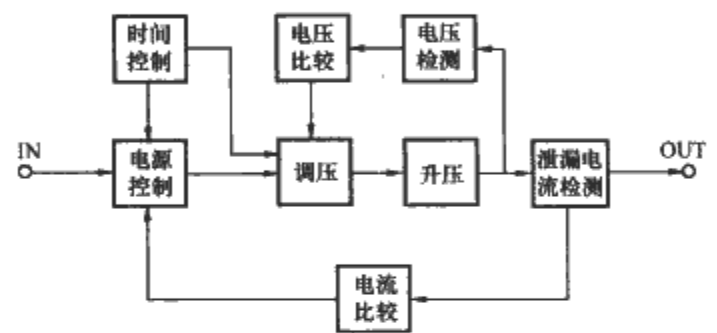


图 5.8-9 工频耐受电压试验设备原理框图

工频电源经调压和升压后输出工频高压给试品进行耐压试验。在输出中进行漏电流和电压检测,电压检测使自动升压达整定值,当泄漏电流超标或短路击穿、闪络时切断电流。规定施压时间到达后实施降压和断电。工频耐受电压试验设备在输出端短路时应能输出0.5A电流,电压等级可以为3kV、5kV等,泄漏电流应能在5~200mA内选择,时间应至少1min。当对变压器容量有要求时,应能满足容量要求,调压器和变压器均应符合1kV/0.5kVA的要求。

4.1.1 试验要求

(1) 试验样品。被试电器的安装和接线应与电器正常使用情况一致。当被试电器的电路包括电动机、测量仪表、微动开关和半导体装置等元件时,若这些元件已按有关规定进行了工频耐受电压试验,则在试验前应将这些元件拆除。

(2) 环境条件。温度、湿度的上升对绝缘材料的电气强度是不利的,因为水分不论在绝缘体表面或内部均能增加导电性能,使其击穿电压降低;而热击穿主要取决于绝缘材料温度的高低,一般而言固体绝缘材料的温度每升高 100°C ,其电气强度约下降75%。因此,如考核电器绝缘结构的耐湿热性能,则试验应在湿热试验后于湿热试验设备中进行,其他情况下的工频耐受电压试验可在室温下进行。

(3) 试验电源。对于50Hz或60Hz的电器,试验电源应采用45~65Hz的工频电压。频率对电气强度的影响是与温度密切相关的,绝缘体在交变电压作用下,由于交变极化要产生介质损耗使绝缘体发热,如每一周波的介质损耗一定,那么频率增高则介质损耗增加,温度也随之上升,因而频率越高则击穿电压越低,故对耐压试验的电源频率必须作出规定。

试验电源的电压应是正弦波。固体绝缘材料的击穿与电压波形有关,如果电压波形的峰值是冲击性的,虽然在极短时间电压峰值就已过去,但有时会造成绝缘体部分击穿,会

造成绝缘材料的介质损耗增大，电气强度大大降低。为使电压值的变化均匀，以避免由于电压波形的峰值冲击而降低击穿电压，所以要求试验电压为正弦波形。

试验电源的容量应满足：当其高压输出端短路时，其输出电流应不小于 200mA。这一规定的目的是保证试验电源部分的阻抗大大小于泄漏电阻，因而在被试电器电气强度降低时仍能保持一定的试验电压值。

4.1.2 试验方法

(1) 试验设备及其操作。进行工频耐受电压试验需要一套试验设备，包括高压试验变压器、调压器、测量仪表、控制和保护装置，其接线图有多种，但工作原理基本相同。现介绍图 5.8-10 所示的接线图作为参考。

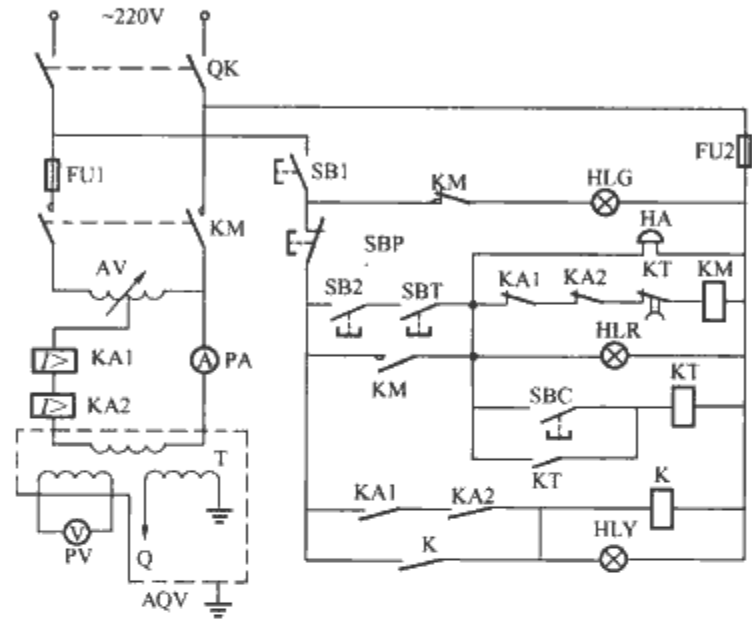


图 5.8-10 常规工频耐受电压试验接线图

QK—电源开关；KM—交流接触器；AV—调压器；T—试验变压器；KA—过电流继电器；KT—时间继电器；K—中间继电器；PA—电流表；PV—电压表；FU—熔断器；SB1—安全开关；SB2—零位开关；SBT—起动按钮；SBP—停止按钮；SBC—控制按钮；HLG、HLR、HLY—绿色、红色、黄色信号灯；HA—电铃；Q—被试电器；AQV—金属安全网

由于是高电压试验，线路上有几个联锁和保护环节。图中高压部分用金属安全网 AQV 围起来，安全网接地，网门上装安全开关 SB1，关上门，SB1 触头闭合，才能接通试验变压器 T。线路中零位开关 SB2 和起动按钮 SBT 串联，保证调压器处于零位时才能接通电源，避免在高压侧产生脉冲高压。当被试电器击穿时，过电流继电器 KA 能使电源自动切断，以保护试验变压器不致烧坏。

线路操作过程为：将被试电器 Q 接于高压输出端，关上安全网门，安全开关 SB1 自动接通。合上电源开关 QK，绿灯 HLG 亮，表示电源有电。调压器 AV 在零位时零位开关 SB2 闭合，按下起动按钮 SBT，接触器 KM 接通，接触器的触头接通试验变压器电源，同时电铃 HA 发出报警声，警告其他人员勿靠近试验区，以免发生危险；并且绿灯 HLG 灭、红灯 HLR 亮，表示试验设备可以投入运行。调压器 AV 由零匀速升压，待试验变压器 T 输出电压达到试验电压值时，保持规定的加压时间。然后以平滑而迅速的速度降压，降到零后按下停止按钮 SBP，接触器 KM 动作，切断试验变压器电源，与此同时电铃 HA 停止发声，红灯 HLR 灭，绿灯 HLG 亮。最后，分断电源开关 QK，切断试验电源。

如需要自动计时试验时，可按下控制按钮 SBC，使时间

继电器 KT 接通进行计时。

试验过程中如被试电器发生击穿，线路电流突然增大，过电流继电器 KA 动作，使接触器 KM 动作，切断试验变压器电源，与此同时中间继电器 K 接通，使黄灯 HLY 亮发出击穿信号，黄灯 HLY 在非击穿跳开电源时不亮。击穿后按下停止按钮 SBP，切除事故信号。

图 5.8-10 中试验电压的测量，是在试验变压器测量绕组上用电磁式或电动式交流电压表测量。也可以在高压侧用高压静电电压表测量，或者在高压侧通过电压互感器测量。但不允许测量试验变压器的一次侧供电电压，然后乘以试验变压器的电压比来求出耐压试验电压，这是因为试验变压器的内阻抗较大，会引起较大的测量误差。试验电压用有效值表示。

(2) 电压施加部位。电器工频耐受电压试验的电压施加部位如下：

- 1) 触头处于所有正常工作位置时，连接在一起的主电路（包括所有接至主电路的控制电路和辅助电路）的所有接线端子与外壳或金属安装板之间。
- 2) 触头处于所有正常工作位置时，主电路每极与连接在一起并接至外壳或金属安装板的其他极之间。
- 3) 不接至主电路的每个控制电路和辅助电路与主电路、其他电路、外露导体部件、外壳或金属安装板之间。（以上部位合适者可连接在一起，以便简化试验）
- 4) 对隔离电器触头处于断开位置时，连接在一起的所有电源端的接线端子与负载端的接线端子之间。

(3) 电压施加时间。试验电压应施加 5s。各种绝缘材料均有其在无限长时间内所能承受的最大电压，若超过此电压，经一定时间就要发生击穿，施压时间越短，所能承受的电压越高，故对施压时间必须作出规定。

试验时为防止电压冲击，应从小于试验电压值的一半开始，以约 5s 时间逐步升至规定值。施压时间应从达到规定试验电压值时算起，至降低电压时为止。施压结束时，应待降压后再切断电源，以免产生操作过电压。

对于直流电器同样可以采用交流电压进行耐压试验。因为无论直流还是交流电器，都要承受电路中可能出现的瞬态过电压。

4.1.3 试验依据

工频耐受电压试验的试验电压值与电器的额定绝缘电压 U_i 有关。国家标准规定：

(1) 电器的主电路和接至主电路的控制电路和辅助电路，工频试验电压值应符合表 5.8-8 的规定值。

表 5.8-8 与额定绝缘电压对应的介电试验电压	
额定绝缘电压 U_i (V)	介电试验电压 (交流有效值) (V)
$U_i \leq 60$	1000
$60 < U_i \leq 300$	2000
$300 < U_i \leq 690$	2500
$690 < U_i \leq 800$	3000
$800 < U_i \leq 1000$	3500
$1000 < U_i \leq 1500$ ①	3500

① 仅适用于直流。

(2) 不接至主电路的控制电路和辅助电路，工频试验电压值如下：当额定绝缘电压 U_i 小于 60V 时为 1000V（有效值）；当额定绝缘电压 U_i 大于 60V 时为 $(2U_i + 1000)$ V，但不小于 1500V（有效值）。所施加电压的有效值应在规定值的 $\pm 3\%$ 范围内。

4.1.4 试验结果的判定

在试验过程中,被试电器应无内部或外部的绝缘闪络、击穿或任何破坏性放电现象,但辉光放电是允许的。

4.2 冲击耐受电压试验及设备

冲击耐受电压试验是对电器在正常工作中要求电隔离的部件之间施加一波形标准化了的冲击电压波,以考核其承受瞬时高频过电压的能力。冲击耐受电压试验主要用来验证电器的电气间隙和有关的电器固体绝缘的介电性能。

冲击耐压使用的电压波为 IEC 规定的标准脉冲电压波,波前沿宽 $1.2 \times (1 \pm 30\%) \mu\text{s}$,全波从零至峰值再降至 50% 峰值时脉宽 $50 \times (1 \pm 20\%) \mu\text{s}$ 。冲击耐受电压试验设备原理框图如图 5.8-11 所示。

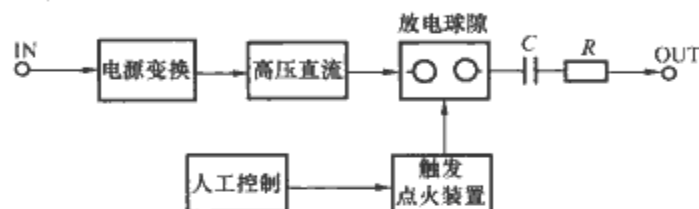


图 5.8-11 冲击耐受电压试验设备原理框图

电源经变换后,变为高压电源整流,获高输出阻抗直流高压电源,通过人工控制的触发点火装置对放电球隙进行点火,可在输出回路中产生脉冲高压输出,调整输出回路中的电阻、电容值可得到规定的冲击电压波形。

球隙的尺寸与冲击波峰值有一定的对应关系,因此球隙的距离尺寸可调整,以得到不同峰值的输出电压,该电压值在不同的空气相对密度下应进行修正。

4.2.1 试验要求

(1) 试验样品。被试电器的安装和接线应与电器正常使用情况一致。

(2) 冲击电压波形。进行冲击耐受电压试验,必须规定冲击电压波形。电力系统中所出现的大气过电压,在绝缘没发生闪络现象时通常需具有全波形式,全波是一种非周期性的冲击波,其波头部分电压上升很快,然后缓慢地降至零。冲击耐受电压试验就是以全波形式模拟大气雷电波进行的试验,标准冲击电压波形如图 5.8-12 所示。图中 t_1 指电压从 0 上升至 100% 峰值的时间, t_2 指电压从 0 至峰值再下降到 50% 峰值的时间。 $t_1 = 1.2 \mu\text{s}$,允许误差 $\pm 30\%$; $t_2 = 50 \mu\text{s}$,允许误差 $\pm 20\%$ 。脉冲峰值 U_m 的允许误差为 $\pm 3\%$ 。

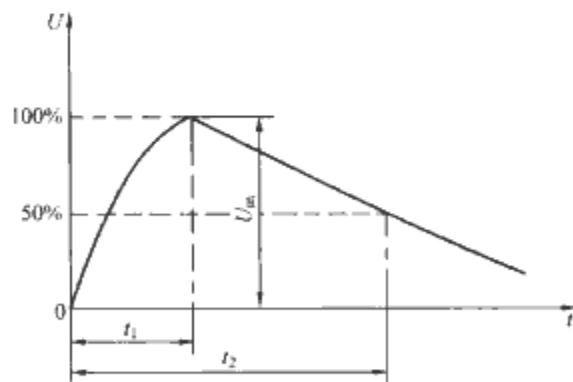


图 5.8-12 标准冲击电压波形 (1.2/50)
 t_1 —脉冲前沿; t_2 —脉冲宽度; U_m —脉冲峰值

4.2.2 试验方法

(1) 试验设备及其原理。冲击耐受电压试验常使用标准冲击波耐压试验仪,它是专用的产生标准冲击电压波的设备,由调压器、升压变压器、充放电电路和球隙等组成,如图 5.8-13 所示。其主要部分是充放电电路,利用电容的并

联充电和串联放电得到高电压冲击波,其原理如下:

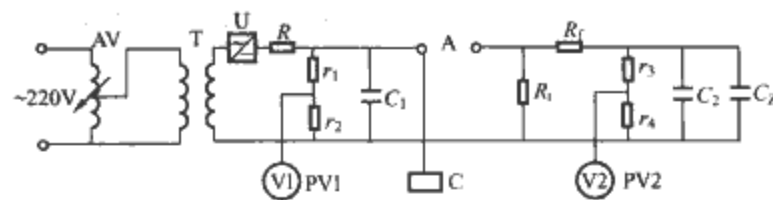


图 5.8-13 标准冲击波耐压试验仪工作原理图

AV—自耦调压器; T—升压变压器; U—整流硅堆;
A—放电球隙; C_Z —被测介质; PV1—直流高压检测用电压表; PV2—峰值电压检测用电压表;
C—触发控制装置

用调压器 AV 使升压变压器 T 的输出电压上升至要求数值后,经整流硅堆 U 对主电容 C_1 充电,然后由触发控制装置 C 触发球隙 A,使两球瞬间放电导通。 C_1 经波头电阻 R_1 对调波电容 C_2 充电,这一充电过程形成了冲击电压波的波头,充电至峰值后 C_1 和 C_2 经波尾电阻 R_2 放电,形成冲击电压波的波尾; C_2 的充电放电过程在被测介质 C_Z 两端形成了标准冲击电压波。标准波的充电时间常数为 $T_1 = R_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$,放电时间常数为 $T_2 = R_2 (C_1 + C_2)$ 。通过调节冲击回路中电阻、电容参数可调整标准波的波形,试验时由于冲击回路中电阻、电容均为常数,由此也就决定了前沿时间 t_1 和半值宽度时间 t_2 ,它们都不随电压的高低而变化,即输出冲击电压在整个可调值范围内波形是恒定不变的。由于试品在正常情况下仅有很小的分布电容, $C_Z \ll C_2$,所以它不会影响输出冲击电压波的波形。

当施加试验冲击电压升至预定值时,若被试品未被击穿或闪络,则电压表 PV2 能显示正常的峰值电压;若被试品击穿或放电,相当于 C_Z 短路,则调波电容 C_2 短路,冲击回路参数改变,输出的峰值和波形也随之变化,电压表 PV2 所显示的峰值电压将低于原先调节的数值,根据峰值电压的变化或试品的击穿放电现象即可判断试验结果是否合格。

输出冲击电压是由 2 : 1 的分压器分压后输入电压表 PV2 检测,整机检测精度约为 $\pm 5\%$ 。

(2) 电压施加部位。电器冲击耐受电压试验的电压施加部位与工频耐受电压试验相同。

(3) 电压施加次数与极性。冲击耐受电压试验时,应施加正、负极性的冲击电压各 5 次,每次之间的时间间隔至少 1s。

4.2.3 试验依据

对于规定了额定工作电压的电器,其额定冲击耐受电压应不低于该电器所使用线路的电源系统名义电压和相应的过电压类别所对应的额定冲击耐受电压。电器设计时一般考虑电器应适用于多种电源系统和几种过电压类别,因此电器的额定冲击耐受电压应按预期使用的多种电源系统中最高的名义电压和最高的过电压类别来确定。

电源系统的名义电压与电器的额定冲击耐受电压的关系见表 5.8-9 和表 5.8-10。电器的额定冲击耐受电压应按其安装条件,即电源系统的名义电压和过电压类别,在表 5.8-9 和表 5.8-10 中确定。电源系统的名义电压与电源系统相对地最大电压及电源系统连接方式有关。过电压类别是根据电路中产生的预期瞬态过电压和为限制过电压而采用的方法而确定的分类。表 5.8-9 和表 5.8-10 中的数据是针对海拔 2000m 处确定的。

4.2.3.1 主电路的冲击耐受电压

(1) 带电部件至接地部件和极与极之间的电气间隙及有关的固体绝缘应承受表 5.8-11 对应于额定冲击耐受电压的试验电压考核。表 5.8-11 中还列出了低于 2000m 的不同海拔处的修正值,这是因为随试验地点海拔的升高,空气变得稀薄,气体分子自由行程增大,会造成空气间隙击穿电压下降。

(2) 断开触头间的电气间隙及有关的固体绝缘应承受在有关产品标准中规定的冲击耐受电压;对具有隔离功能的电器,应承受表 5.8-12 对应于额定冲击耐受电压的试验电压考核。

表 5.8-11		冲击耐受电压				
额定冲击 耐受电压 U_{imp} (kV)	试验电压和相应的海拔					
	U (1.2/50 μ s) (kV)					
	海平面	200m	500m	1000m	2000m	
0.33	0.35	0.35	0.35	0.34	0.33	
0.5	0.55	0.54	0.53	0.52	0.5	
0.8	0.91	0.9	0.9	0.85	0.8	
1.5	1.75	1.7	1.7	1.6	1.5	
2.5	2.95	2.8	2.8	2.7	2.5	
4	4.8	4.8	4.7	4.4	4	
6	7.3	7.2	7	6.7	6	
8	9.8	9.6	9.3	9	8	
12	14.8	14.5	14	13.3	12	

注 表 5.8-11 适用于均匀电场,情况 B。

表 5.8-12 隔离电器断开触头间的试验电压					
额定冲击 耐受电压 U_{imp} (kV)	试验电压和相应的海拔				
	U (1.2/50 μ s) (kV)				
	海平面	200m	500m	1000m	2000m
0.33	1.8	1.7	1.7	1.6	1.5
0.5	1.8	1.7	1.7	1.6	1.5
0.8	1.8	1.7	1.7	1.6	1.5
1.5	2.3	2.3	2.2	2.2	2
2.5	3.5	3.5	3.4	3.2	3
4	6.2	5.8	5.8	5.6	5
6	9.8	9.6	9.3	9	8
8	12.3	12.1	11.7	11.1	10
12	18.5	18.1	17.5	16.7	15

4.2.3.2 辅助电路和控制电路的冲击耐受电压

(1) 直接从主电路引入额定工作电压的辅助电路和控制电路,应承受表 5.8-11 对应于额定冲击耐受电压的试验电压考核。

(2) 不直接从主电路引入额定工作电压的辅助电路和控制电路,其过电压能力不同于主电路,这类电路的电气间隙和有关的固体绝缘应承受表 5.8-9 和表 5.8-10 中规定的适当电压的考核。

4.3 绝缘电阻的测量及设备

不同物质的分子和原子的结构不同,对电荷的束缚能力也不同。绝缘材料对电荷的束缚力很强,所以具有很好的绝缘性能。但理想的绝缘材料是不存在的,因为绝缘材料中或多或少存在着一些自由电荷,当对绝缘材料施加电压后,这些电荷会从电介质中分离出来,并在电极上中和形成泄漏电流。所加电压越高,分离出来的电荷越多,形成的泄漏电流

就越大。

绝缘材料在电压作用下所通过的泄漏电流的大小,能反映其电阻的大小,这个电阻就叫做绝缘材料的绝缘电阻。它表示绝缘材料对电的绝缘能力,泄漏电流越大,绝缘电阻越小,即其绝缘性能越差。绝缘材料即使在很高的电压作用下,也只能通过极少量的泄漏电流,所以一般用 M Ω 作为测量单位。

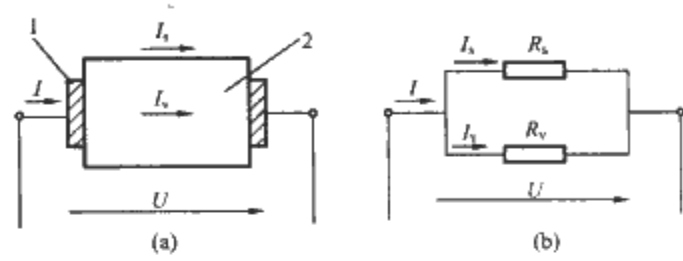


图 5.8-14 绝缘结构的泄漏电流和等效电路
(a) 泄漏电流; (b) 等效电路
1—电极; 2—绝缘材料

电器中两个电极之间绝缘结构的泄漏电流和等效电路如图 5.8-14 所示,在电极上加直流电压 U 后,就会在绝缘材料上产生沿体积泄漏的电流 I_v 和沿表面泄漏的电流 I_s ,也即绝缘材料存在体积绝缘电阻 R_v 和表面绝缘电阻 R_s ,绝缘结构的绝缘电阻 R_i 是外施直流电压 U 和总泄漏电流 I 之比,即 $R_i = \frac{U}{I}$ 。由于 I 为 I_v 与 I_s 之和,所以 $R_i = \frac{R_v R_s}{R_v + R_s}$ 。

体积绝缘电阻与绝缘材料内部的情况(如杂质、气泡、组织不匀等)及本身的温度、湿度有关;表面绝缘电阻则与绝缘材料表面的情况(如表面粗糙度、清洁情况等)及外界的气候条件有关。因此绝缘电阻不但与材料和杂质的本性有关,还与外界温度、湿度等条件有关。

绝缘电阻随温度与湿度的升高而下降。体积绝缘电阻对温度变化非常敏感,而表面绝缘电阻则对湿度变化非常敏感。绝缘材料的绝缘电阻是体积电阻和表面电阻的函数,因此,对绝缘电阻的测量,必须在规定的温度与湿度范围内进行。

应当指出,绝缘电阻的大小并不是在所有情况下都能反映绝缘结构的绝缘性能的好坏。如绝缘结构经烘烤、老化后在不受潮时仍能保持相当高的绝缘电阻值,可是在较高的电压作用下却很容易被击穿。另外,绝缘结构表面一时受到潮湿或玷污,其绝缘电阻值会显著下降,但它所能承受的电压却未必降低。因此,为可靠地断定绝缘结构的绝缘性能,还应

对绝缘结构进行电气强度试验。绝缘电阻测量是测量电器在正常工作中属于电隔离的部件之间的绝缘强度,它是设备简单、测试方便、对绝缘结构无破坏作用的介电性能试验项目。

4.3.1 测量条件

(1) 试验样品。测量绝缘电阻时被试电器应按正常工作位置安装,以使电器的绝缘结构符合正常工作条件。为清除表面条件对测量结果的影响,测量前必须用干燥、清洁的纱布将电器表面的灰尘污垢擦净。

正常工作中接地的所有外裸导体部件(金属外壳、金属手柄等)应连接到金属支架上;若外壳、手柄是绝缘材料的,则应包覆一张金属箔,并与金属支架相连接。对于带有绝缘底座的电器,应按规定位置安装在金属支架上。

不带外壳但准备在外壳中使用的电器,应在规定的最小外壳中进行试验。当电器的绝缘性能与引线、抽头或所用特殊绝缘材料有关时,在试验时应使用这种引线、抽头或特殊

材料。

(2) 环境条件。环境温度、湿度等条件的变化对绝缘电阻有显著影响，在正常环境条件下测量绝缘电阻可衡量电器的绝缘水平，在不同环境条件下测量绝缘电阻的变化，可进一步评价电器的绝缘性能。

4.3.2 测量方法

(1) 绝缘电阻测量仪表。电器的绝缘电阻常用绝缘电阻表来测量。它由手摇直流发电机和差动式电流表组成，由手摇发电机产生近似恒定的直流电压，通过检测泄漏电流，在表头上直接显示绝缘电阻值，以 $M\Omega$ 表示。

由于绝缘电阻表发电机是手控的，它的转速不可能保持额定转速，为此，差动式电流表采用流比计原理结构，也就是仪表指针的偏转角 α 不单纯取决于泄漏电流，也取决于泄漏电流与另一施加同电压的分流电路中电流的比值，即 $\alpha = f(I_1/I_2)$ 。其中， I_1 为被测绝缘体的泄漏电流； I_2 为通过接有附加电阻的电路的电流。由于发电机输出电压变化时这个电流比值基本保持不变，所以电压变动引起的测量误差并不大。

(2) 绝缘电阻表的使用。绝缘电阻表有不同的电压等级，按电器的额定工作电压来选择，其要求见表 5.8-13。被试电器额定工作电压越高，绝缘电阻表的电压等级越高，则测量条件越接近实际工作条件，且绝缘结构的质量缺陷越易发现，但应注意其电压等级应不超过电器的电气强度电压值，以免造成击穿或损害。

表 5.8-13 对绝缘电阻表额定电压等级的要求

电器的额定工作电压 (V)	绝缘电阻表额定电压等级 (V)
$U_N \leq 60$	250
$60 < U_N \leq 660$	500
$660 < U_N \leq 1200$	1000

注 其中 500V 为常用电压等级。

(3) 绝缘电阻测量部位。绝缘电阻的测量部位由有关产品标准规定，若没有规定，可按电器产品特征选取以下部位：

- 1) 主触头在断开位置时，同极的进线端与出线端之间。
- 2) 主触头在闭合位置时，不同极的带电部件之间、触头与线圈之间以及主电路与控制电路和辅助电路之间。
- 3) 各带电部件，包括主电路、控制电路和辅助电路与金属支架之间。

对于额定工作电压不同的电路应分别进行测量。

5 动作范围试验及设备

5.1 电器动作特性测定试验及设备

许多低压电器，如接触器、电磁式继电器、自动开关中的电磁脱扣器等，都是用电磁机构来操作的，所以电磁机构能否准确无误地吸合与释放是这些电器正常工作的首要条件。电器动作值的测定，就是测量电磁机构的吸合动作值和释放动作值，检查它是否符合产品标准或技术条件的规定。电器的操作电磁铁有电压线圈与电流线圈两种，对电压线圈来说动作值就是吸合电压和释放电压，对电流线圈就是吸合电流和释放电流。吸合电压或吸合电流是指电器刚能吸合时的值，释放电压或释放电流是指电器刚能释放时的值。当加在线圈上的电压或电流达到吸合值或释放值时，电磁机构的可动部分应可靠吸合或释放，而不致停留或卡住在中间位

置。具体做法为：

(1) 若被试电器的安装位置允许偏离正常安装位置一定倾斜角度，则应取最不利的安装位置进行动作值的测定。在测量吸合值时，被试电器的安装位置要使电器可动部分的重力所产生的反力为所有允许的安装位置中的最大者，此时重力产生的反力特性为最高。在测量释放值时，则应取可动部分的重力所产生的反力为最小的安装位置，这时反力特性为最低。例如 CJ12 系列交流接触器，在测定吸合电压时，应使其安装位置较正常位置前倾 5° ，测释放值时应后倾 5° 。

(2) 反力特性与被试电器的极数、辅助触头对数、触头参数的公差有关。在测定动作值时，应使这些参数调整到产品标准或技术条件所规定的极限值。例如在测定带动合主触头接触器的吸合电压时，触头压力及超行程应调至产品技术条件所规定的最大允许值，同时被试电器应选本类型中极数与动合辅助触头数最多，动断辅助触头数最少的产品，以便使反力特性上移到极限位置。

其次，吸力特性的位置和线圈安匝数有关。对带电压线圈的电器来说，即使电压恒定，由于线圈电阻随线圈温度改变，吸力特性也要发生变化，这就要影响动作值。当线圈温度增加时，线圈电阻变大，电流降低，同一电压下的吸力特性要下移，吸合电压值就要增加；反之，温度降低，电阻减小，同一电压的吸力特性要上移，反力特性不变时，释放电压就会降低。考虑到上述情况，为了从严考核，一般规定：在最高周围介质温度下，被试电器在规定工作制下，通以规定的电流发热至稳定状态下，也即线圈处于热态下，测定吸合电压值；在最低周围介质温度下，在冷态下测定释放电压值。

温度对动作值的影响在交流和直流场合有所不同。直流电压线圈的电器，其吸合电压 U_x 为吸合电流 I_x 与线圈电阻 R 的乘积。即

$$U_x = I_x R \tag{5.8-10}$$

由此可见，电阻的变化会直接影响到吸合电压 U_x 。如在室温和冷态下测定的吸合电压合格，在周围介质温度较高和热态下，由于线圈电阻的增加，就可能变为不合格，因此必须按上述规定进行测定。

对于交流电压线圈的电器，其吸合电压是吸合电流 I_x 与线圈阻抗 Z 的乘积，即

$$U_x = I_x Z = I_x \sqrt{X_L^2 + R^2} \tag{5.8-11}$$

对于大多数带交流电压线圈的电器来说，其线圈电抗 X_L 比电阻 R 大得多，即 $X_L \gg R$ ，因而当线圈温度变化时， R 虽有变化，但吸合电压 U_x 变化较小，可以忽略温度的变化，故吸合电压允许在室温及冷态下测定。但对于线圈电抗不大而电阻较大，即不符合 $X_L \gg R$ 条件的交流电压线圈的电器，其吸合电压仍应在规定的最高介质温度及热态下进行测定。

以上是从静态吸力特性和反力特性来讨论电器动作值的测量。实际上，当电器接上电源后，由于线圈电感的作用，以及在衔铁吸合过程中电感的变化，线圈电流也发生变化。为了正确计及暂态电流的影响，对动作值测定作如下规定：

1) 测定带电压线圈电器的动作值时，应将电压先调至预期动作值，再瞬时接通电路进行测定，也即试验中的电压是瞬时加到线圈上的，而不是接通线圈电路后，再逐步增加的。这种方法与电器实际使用的情况相符，并如实地反映了暂态分量电流的作用。用逐步升压的试验方法，线圈中的电流与实际情况不同，会造成测量误差。

2) 测定带交流电压线圈电器的动作值时，由于非周期

分量电流与线圈合闸相角有关,如有选相合闸装置,应在最不利合闸的相角下试验两次;如无选相合闸装置,则在型式试验时,应试验6~20次。

5.1.1 电磁式控制电器和控制继电器的动作特性试验

下面以测定交流接触器动作值为例,说明动作特性试验的线路和方法。图5.8-15为交流接触器动作值的测定线路,用调压器AV供电。按国家标准规定,接通线圈电源后,要求电源电压波动相对于空载电压而言小于5%,这是因为在衔铁闭合过程中,线圈端电压波动过大,会影响测量的准确性。图5.8-16为衔铁闭合过程中线圈端电压的变化情况。当 $t=t_1$ 时线圈通电,由于衔铁尚处于打开位置,交流电磁机构的起动电流较大,造成电源内阻抗压降也较大,使线圈端电压由空载电压 U_0 降低到 U_1 。随着衔铁闭合,线圈阻抗变大,电流减小,端电压就回升。当 $t=t_2$ 时,衔铁闭合,线圈端电压增至 U_2 ,但 U_2 仍小于 U_0 。衔铁闭合过程,线圈端电压的变化会影响动作值测量的正确性,因此要求电源内阻要小,容量要满足前述规定。若电源容量不能满足电源电压波动小于5%的要求,作为补充办法,允许以衔铁完全闭合时的电压,即图5.8-16中的电压 U_2 作为电器的吸合电压值。

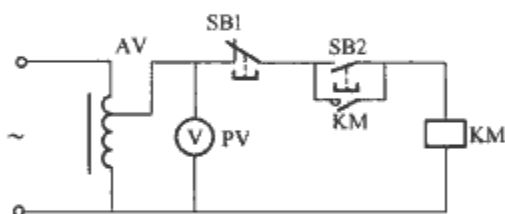


图 5.8-15 交流接触器动作值的测定线路
AV—调压器; SB1—启动按钮; SB2—停止按钮;
KM—交流接触器; PV—电压表

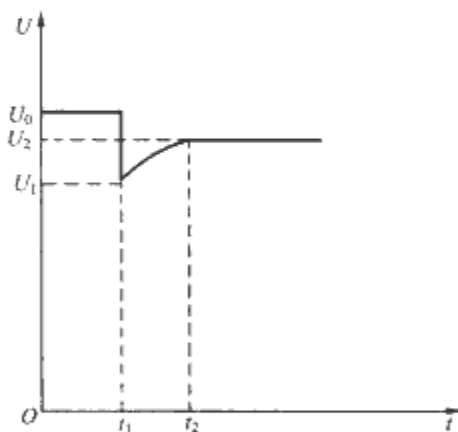


图 5.8-16 交流接触器动作值测定时电源电压的波动

测定接触器的吸合电压时,首先将电源电压调到1.05倍线圈的额定电压,接通电源,使线圈发热到稳定状态,然后断开线路,调节电压到接触器规定动作值,按下按钮SB1,若接触器可靠吸合,按下按钮SB2使线圈断电,再重复进行20次,若都能可靠吸合,则认为被试电器合格。

测定接触器的释放电压时,要求将电压从额定值起连续降低,取衔铁开始释放的电压表读数。一般,将电压先升至1.05倍线圈额定电压,再逐步降低,因为起始电压高,磁系统剩磁也大,衔铁不易释放,考核条件较严,这里1.05倍线圈额定电压是接触器工作时允许的电源电压波动上限值。

5.1.2 过电流脱扣器和电流继电器的动作特性试验

低压断路器的产品标准中规定“瞬时过电流脱扣器的动作电流与整定值的误差应不大于 $\pm 20\%$ ”,亦即瞬时过电流

脱扣器动作特性试验的要求为:当通以80%的整定电流时断路器应不动作,通以120%的整定电流时断路器应可靠地工作。电流继电器的动作特性试验是指其吸合电流与释放电流的测定。

(1) 动作特性试验要求。过电流脱扣器和电流继电器动作特性试验的基本条件(安装位置、试验时是否带外壳、试品是否已达到冷态等)与电磁式控制电器和控制继电器动作特性试验相同。其试验电源及测试时的周围空气温度应满足下列要求:

1) 交流试验电源的电流波形应基本上是正弦波,频率应为被试电器的额定频率,允许误差为 $\pm 5\%$ 。

2) 直流试验电源应保证电流波形的纹波系数不大于5%。

3) 测定电器动作特性时,对衔铁打开时的线圈电流而言,电流的波动应不大于5%。

4) 如果产品标准或技术条件规定在最高周围空气温度下必须处于热态时,或在最低周围空气温度下必须处于冷态时测定动作特性,则应在这种环境条件下进行测定。否则,也可以经过验证给出在常温下进行测定的换算方法。

(2) 动作特性试验方法。

1) 测定电流继电器的释放电流时,应将电流从额定值起连续递减,以开始释放时的读数作为释放电流。测定吸合电流时,应先将电流调整至要求的吸合电流值,然后接通电路进行试验,以吸合前的读数作为吸合电流。

2) 测定交流继电器的吸合电流时,可在试验电路中接入适当的附加电阻,以保证试验电流对称(即基本上没有直流分量),在这样的条件下,吸合电流和释放电流的测定次数均为2次。

3) 直流电流继电器吸合电流与释放电流的测定次数,在型式试验时不少于6次,每2次试验后改变电源极性。

4) 过电流脱扣器的试验电流应对称,即基本上没有直流分量。

5) 除产品标准或技术条件另有规定外,多极电器的瞬时及定时限过电流脱扣器的动作特性试验可以采用单相电源进行。试验时将被试电器的各极串联起来,通以试验电流进行脱扣与不脱扣试验。

6) 多极电器的长延时过电流脱扣器的动作特性试验,可采用三相电源或单相电源。

7) 对于瞬时过电流脱扣器的不脱扣试验,电流持续时间应不小于0.2s;对于定时限过电流脱扣器,则应不小于规定动作时间的2倍。

5.1.3 动作特性试验设备

目前国内低压电器的特性试验大多采用传统的调压器加电阻器的方式手动或电动进行试验电压、试验电流的调整。检测仪表采用直接显示方式的电流、电压表或示波器,试验参数及试验过程靠手工进行观测和记录。

由于目前的试验设备普遍存在着试验操作不方便、试验参数不稳定、试验控制和检测手段落后等缺陷,实际上试验过程很难严格满足产品标准所规定的试验要求。

专用的动作特性自动试验设备大大提升了检测水平和检测效率,其主要功能为:

(1) 采用计算机控制,可实现试验过程和试验参数的自动控制,切换试验电源的相数以及试品,包括极性的切换、参数的自动调节。

(2) 试验数据自动采集、储存和处理。

自动试验设备主要由以下部分组成:

1) 试验电流调节单元。试验电流包括负载电流和剩余电流,而剩余电流包括交流正弦电流、脉动直流电流和平滑直流电流。该单元具有试验电流值连续可调、调节电流速度可控及稳流功能。

2) 试验电压调节单元。试验电源包括主电源和辅助电源。该单元具有试验电压值连续可调、调节电压速度可控及稳压功能。

3) 线圈驱动单元。该单元可实现对交直、流线圈的驱动。

4) 试验数据采集单元。试验数据包括试验输入参数和试验输出参数。通过计算机软件对试验过程进行控制,并自动采集与处理试验数据。

5) 试验数据管理系统。可完成试验项目管理、试验数据管理、试验人员权限管理、数据查询等功能,并进行报表输出。

5.2 保护特性测定试验及设备

当低压供电线路中发生过载或短路等故障时,低压供电线路中起保护作用的电器元件(如低压断路器、熔断器及热继电器等)就会动作,使电路切断,以保护供电线路、电源设备及用电设备不因过载或短路等故障而烧毁。

对低压断路器及热继电器来说,保护特性是指它们的动作时间 t (从过载或短路开始至低压断路器或热继电器的触头打开为止所需的时间)与它们通过的电流 I 的函数关系,即 $t = f(I)$ 。为了表示的方便,低压断路器和热继电器的保护特性常用 $t = f(I/I_N)$ 来表示,式中 I_N 为低压断路器过电流脱扣器的额定电流或热继电器的刻度电流。

对于熔断器,保护特性是指它的熔断时间(从过载或短路开始至熔体熔断后电弧熄灭为止所需的时间)与线路预期电流(在线路装熔断器的地方,用阻抗可忽略不计的导体代替时,线路可能流过的电流)周期分量有效值的函数关系, $t = f(I)$ 。

5.2.1 保护特性试验要求

进行保护特性测定的试验时,电器安装位置、周围环境、产品参数调整、试验电路、电源以及测试时的周围空气温度等应满足下列要求:

(1) 测定保护特性时,电器应按正常工作位置安装,并安装在不受外界空气、阳光或其他热辐射作用之处。

(2) 电器应符合实际使用情况,对于低压断路器,其脱扣力应调整在产品标准所规定的范围内。

(3) 连接导线的长度及截面,应按产品标准中规定的长度及尺寸选择。

(4) 进行熔断器的保护特性试验时,如燃弧时间小于总熔断时间的10%,则可用低于额定电压的电源进行试验,否则必须用额定电压电源。

(5) 进行保护特性试验时的周围空气温度,低压断路器应为产品标准所规定的最高周围空气温度;热继电器按一般产品标准规定,型式试验时除了20℃外还应在产品标准所规定的最高空气温度及最低空气温度下分别进行测定;对于熔断器,除非产品标准中规定其保护特性试验应在极限周围空气温度下进行,一般可在大于0℃的室温下进行。

5.2.2 保护特性试验方法

(1) 保护特性测定试验方法的规定。

1) 若要求电器在冷态下进行试验,则在测量室内放置的时间一般应不小于8h;若对电器零件进行温度测量后证明允许减少放置时间,则此放置时间可以缩短。为了缩短冷

却时间,可以采取人工冷却(如用电扇吹等方法),但人工冷却后的冷却时间须在测量电器各部分温度后加以确定。也可用电阻法测量线圈的温度。每小时测一次,如果前后两次测得的线圈温度之差不大于1℃,则认为已处于冷态。

2) 若要求电器在热态下进行试验,则应通以规定的电流(对低压断路器应通以长延时整定电流;对热继电器应通以刻度电流)发热至稳定状态,其通电时间通过测定电器零件温度以满足在1h内温升的变化不超过1℃来确定。为了缩短试验时间,可以通比规定电流稍大的电流,但其通电时间应通过测量电器零件温度,以满足与规定的电流发热至稳定状态时的温度相等来确定。

3) 进行保护特性测定时,通过被试电器的电流应基本上恒定不变。

4) 对测定熔断器保护特性的型式试验,应从最小熔化电流到极限分断能力之间按产品标准或技术条件的规定试验几挡电流。如产品标准中未作规定,则每挡电流各试2次,取平均值作为熔断时间。

5) 进行热保护元件的不动作试验时,通电时间应不小于1h。在测定临界动作电流时,应在通以额定电流发热至稳定状态之后进行,并逐次增加5%左右的额定电流,使其发热至稳定状态,最后测得的2次(前一次不动作,后一次动作)电流的算术平均值即为临界动作电流值。

(2) 主要参数的测定方法。在保护特性测定试验中,主要测量两个参数,即电流 I (通过被试电器的电流或预期电流等)和时间 t (动作时间或熔断时间等)。

电流 I 一般用电流表测量。当电流较大时,一般经电流互感器接至电流表。

时间 t 的测量方法为:如 $t > 1\text{min}$,则一般用电钟;如 $t < 1\text{min}$,则一般用电秒表;如 $t < 0.2\text{s}$,一般用电秒表,当测量误差较大时,则可用示波器采集来测定。

对于熔断器保护特性测定的型式试验,当熔断时间小于0.5s时,要求分别测出熔断时间和熔化时间,所以应采用示波器采集来测定。

5.2.3 保护特性试验设备

微机控制下的断路器、热过载继电器等的保护特性试验设备的主要硬件组成电路和功能见本篇第4章的内容。

6 短路试验及设备

6.1 额定短时耐受电流能力试验

短时耐受电流能力试验是考核开关电器在发生短路故障的情况下,并不分断电路但应能承受短时间、大电流所形成的电动力和热效应的作用而不致被破坏的能力。

短路故障电流通过电器时,同时产生电动力效应和热效应,并同时同时对电器起作用,而且这两种效应对电器的破坏作用又是相互有关联的。电动力效应在电器的动、静触头间所产生的斥力可使触头的接触电阻增大,从而增大触头的发热,即热效应增加。而热效应可使电器的所有载流部件的机械强度下降,从而降低了耐受电动力的能力。因此,严格说来,电动稳定性试验和热稳定性试验是不应分开进行的。短时耐受电流能力试验,就是对电器的电动稳定性和热稳定性的一种综合考核。

表征电器承载短路电流能力的参数是额定短时耐受电流 I_{cw} ,电器的额定短时耐受电流是在有关产品标准规定的试验条件下电器能够无损地承载的短时耐受电流值,该值由制造厂规定。

6.1.1 短时耐受电流能力试验条件

进行额定短时耐受电流能力的试验时，被试电器和试验电路等应满足下列要求：

- (1) 被试电器。
 - 1) 试验应在完好的电器上进行。
 - 2) 被试电器应按正常使用情况接线并完整安装在其固有支架或等效的支架上。
 - 3) 施加到电器接线端子螺钉上的拧紧力矩应按制造厂的规定。
 - 4) 具有整体外壳（构成装置一部分的外壳）的电器应完整地安装在外壳中，正常工作时通常关闭的孔，在试验时应关闭。
 - 5) 预期使用在单独外壳（仅为容纳一台电器而设计和确定尺寸的外壳）中的电器，应在制造厂规定的最小外壳中进行试验。
 - 6) 电器应在自由空气中进行试验。
 - 7) 电器在试验前可以空载操作几次。
 - 8) 满足有关低压电器产品标准中规定的其他附加要求。
- (2) 试验电路。

1) 试验电路由电源、负载电阻器、负载电抗器和被试电器组成。

2) 电源应有足够的容量，以保证制造厂规定的电器特性能够得以验证。

3) 交流电源可以是冲击发电机或电源变压器，电源空载电压波形基本上为正弦，其波形失真度应不大于 5%。

4) 直流电源可以是发电机、蓄电池或三相桥式整流电源，电源空载电压的纹波系数应不大于 5%。

5) 试验负载应由电阻器串联空心电抗器组成，电阻器和电抗器应能调整到满足规定的试验条件。电抗值应由各个电抗器串联耦合得到。只有并联的电抗器具有实际上相同的时间常数的条件下，才允许电抗器并联连接。

6.1.2 短时耐受电流能力试验方法和电路

由于试验要求的不同，短时耐受电流能力试验的试验方法也不同。

6.1.2.1 单相交流短时耐受电流能力试验

(1) 试验电路。单相交流短时耐受电流能力试验的试验电路如图 5.8-17 所示。图 5.8-17 (a) 适用于单极试品，图 5.8-17 (b) 适用于两极试品。图中 Q1 为保护开关；Q2 为合闸开关，电压振子 X1 用于记录试品触头是否被电动力斥开过，因为触头如果被电动力斥开，就必然会有电弧电压出现，则从 X1 记录下的示波图上就可看出此电弧电压的波形，从而可确定试品触头已斥开过。图中接在分流器 RA 上的电流振子 X2 用于测量和记录通过试品的试验电流。

(2) 试验参数的调整。

1) 合闸相角的确定。为了满足短时耐受电流能力试验对第一个半波电流峰值的要求，对于单相试验，一般都采用选相合闸装置。

2) 确定合闸相角的程序。在试验过程中，首先测定试验电路的功率因数，然后查表确定满足电流峰值要求的周期分量有效值，并据此调整电路参数。

3) 调整 I^2t 值的方法。如果选择的电流周期分量有效值大于或小于要求值，则可以适当地减少或增加通电时间，使相应的 I^2t 值等于要求值。

4) 改变合闸相角满足 I^2t 值的方法。如果按第 2) 条方法确定的电流周期分量有效值与试验要求不符，且不允许改变通电时间，则可以改变合闸相角以满足要求。

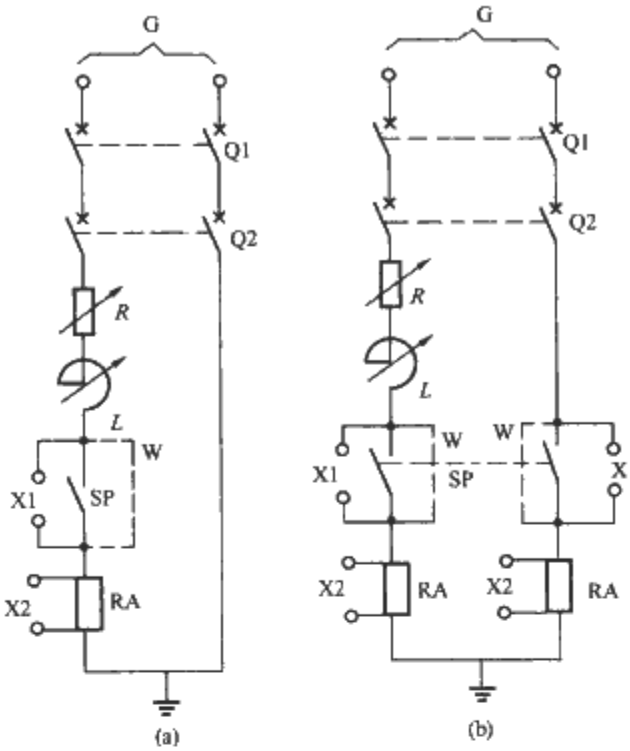


图 5.8-17 单相交流或直流短时耐受电流能力试验电路图

(a) 单极电器试验电路；(b) 两极电器试验电路
G—电源；R—可调负载电阻；L—可调负载电抗器；SP—被试电器；W—调整整定波电流的临时连接线；X1—至示波器记录电压的振子；X2—至示波器记录电流的振子；Q1—保护开关；Q2—合闸开关；RA—分流器

(3) 程序控制。单相交流短时耐受电流能力的试验步骤和程序控制过程为：试品触头闭合→保护开关 Q1 闭合→光线示波器启动→合闸开关 Q2 闭合→试验电流出现并持续约 1s 后保护开关 Q1 自动脱扣断开，把试验电流切断，在此同时示波器拍摄示波图→合闸开关分断→示波器停止拍摄→检查试品和分析示波图。

程序控制过程的时序图如图 5.8-18 所示。



图 5.8-18 短时耐受电流能力试验程序控制过程时序图

图 5.8-18 中， $t_3 \sim t_4$ 是通电持续时间。用选相合闸开关进行单相试验时，可做一次；如无选相合闸开关，则必须做多次，直至试验参数满足要求为止。每进行三次试验后，允许更换产品。

(4) 多磁路变压器的应用。短时耐受电流能力试验可在任意方便的电压下进行，即对试验电压不作要求。多磁路变压器是一种提供低电压可调节大电流的电源装置，与调压器配套使用，适用于试验电流较大的短时耐受电流能力试验。多磁路变压器的结构及应用见本章第 1 节“电源设备”中内容。

6.1.2.2 三相交流短时耐受电流能力试验

(1) 试验电路。三相开关电器进行三相交流短时耐受电流能力试验的试验电路如图 5.8-19 所示。电压振子与电流振子的作用与单相交流短时耐受电流能力试验时相同。从图 5.8-19 中可知，三相电路中各相的阻抗是相同的，各相电流的周期分量也将是相同的，但各相电流的第一个半波峰值

电流并不相同,这是因为三相交流电各相的相位差互为 120° 的缘故。如果选相合闸装置使其中某一相的第一个半波峰值电流为最大并等于要求值,则其他两相的第一个半波峰值电流都将小于要求值,这是三相试验与单相试验的不同点之一。

(2) 试验参数的调整。三相交流试验参数的调整方法与单相交流试验相同。三相试验时如采用选相合闸装置来控制第一个半波峰值电流的大小,也只能控制三相中的一相。如果不要求指定某一相在某一合闸相角下合闸,则三相试验可以不必采用选相合闸装置,即采用一般合闸开关,因为三相试验时无论电压合闸相角如何,总是有一相的第一个半波峰值电流达到最大值或接近于最大值。

三相交流电源进行短时耐受电流能力试验时,试验次数为三次。

(3) 程序控制和试验电源。三相交流电进行短时耐受电流能力试验的程序控制过程与单相试验相同。在试验电流不是很大的场合,试验电源可采用三相调压器和一般的三相大电流变压器组合装置。在试验电流较大的场合,试验电源采用三相调压器和三相多磁路变压器组合装置。

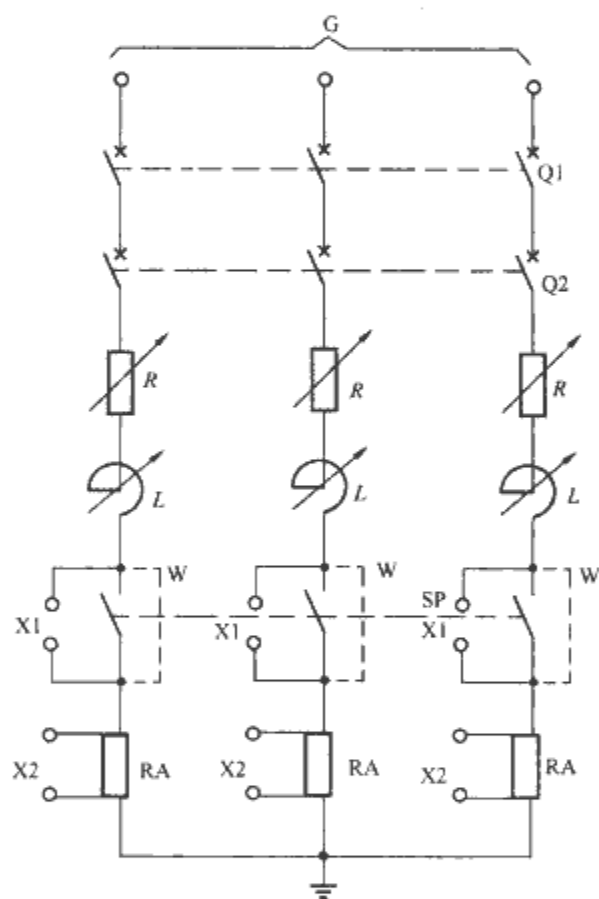


图 5.8-19 三相交流短时耐受电流能力试验电路
G—电源; R—可调负载电阻; L—可调负载电抗器;
SP—被试电器; W—调整整定波电流的临时连接线;
X1—至示波器记录电压的振子; X2—至示波器记录
电流的振子; Q1—保护开关; Q2—合闸开关;
RA—分流器

6.1.2.3 直流短时耐受电流能力试验

(1) 试验电路和程序控制。直流短时耐受电流能力试验电路如图 5.8-17 所示。程序控制与交流试验相同。

(2) 试验参数的调整。由于直流短时耐受电流能力是用直流稳态电流值来表示的,而对试验电路的时间常数 T 不作规定,可随意选取,一般选取 $T=5\sim 10\text{ms}$,目的是使试验电流必须经一定时间后才到达稳态值。这样,如果试品触头受电力作用而被斥开时,可从示波图上测得斥开时的电流值,以便对试验结果进行分析判定。

6.1.3 试验结果的判定

电器额定短时耐受电流的承载能力试验中电器的状况由有关产品标准规定。试验后,触头不发生熔焊,机械部件和绝缘件应无损坏和变形而影响正常工作。要求电器用其正常操动方式操作应能正常动作。

6.2 额定短路接通和分断能力试验

额定短路接通和分断能力试验用来考核开关电器在非正常工作情况下接通与分断电路的能力。这是一种模拟性试验,主要模拟电路中发生短路故障时,电路中安装的开关电器是否能及时可靠地接通和分断此故障电流。

表征电器接通和分断短路电流能力的参数是额定短路接通电流和额定短路分断电流。

(1) 电器的额定短路接通电流 I_{cm} 是在额定工作电压、额定频率、规定的功率因数(对交流电路)或时间常数(对直流电路)下由制造厂对电器所规定的短路接通能力电流值。它用最大预期峰值电流表示。

(2) 电器的额定短路分断电流 I_m 是在额定工作电压、额定频率、规定的功率因数(对交流电路)或时间常数(对直流电路)下由制造厂对电器所规定的短路分断能力电流值。它用预期分断电流值(对交流电路,用交流分量有效值)表示。

为了使模拟开关电器的试验条件与实际使用条件相接近,在进行试验时规定了试验电压值、电流值、试验回路的时间常数(对直流电路)或功率因数(对交流电路)等参数。

6.2.1 额定短路接通和分断能力试验要求

进行额定短路通断能力试验时,对被试电器及试验电路等应满足下列要求:

- (1) 被试电器。
 - 1) 被试电器应完全装配好,并按正常工作位置安装。
 - 2) 具有防护外壳的电器,应完整地装在外壳中,正常工作时通常关闭的孔在试验时应关闭。不与外壳一起供应,但指定在外壳中使用的电器,应在制造厂规定的最小外壳中进行试验。
 - 3) 除非有关产品标准中另有规定,否则试验时不允许维修和更换零部件。
 - 4) 对机械开关电器(如电动或气动操作的电器),应在制造厂规定的预定使用情况下操作,并应在控制参数(如电压和气压)的额定值下操作。对于手动操作电器,试验时闭合速度和操作力应尽可能真实地模拟使用条件。

(2) 试验电路。

- 1) 试验电路由电源、负载电阻器、负载电抗器和被试电器组成。
- 2) 电源应有足够的容量。被试电器进线端的预期短路电流值,至少应是电器短路通断能力试验电流值的10倍。
- 3) 交流电源可以是冲击发电机或电源变压器,电源空载电压波形基本上为正弦,除产品标准或技术条件另有规定外,电源频率应为试品的额定频率,其波形失真度应不大于5%。
- 4) 直流电源可以是发电机、蓄电池或三相桥式整流电源。电源空载电压的纹波系数应不大于5%。
- 5) 试验负载应由空心电抗器和电阻器串联组成,电阻器和电抗器应能调整到满足规定的试验条件。电抗值应由各个电抗器串联耦合得到。
- 6) 当具有大型空心电抗器试验电路的瞬态恢复电压特性不能代表通常使用条件的情况下,每相空心电抗器应并联

分流电阻，分流值大约为通过电抗器电流的 0.6%，如果电抗器接在变压器的一次侧，则无需接入分流电阻。

6.2.2 额定短路接通和分断能力试验方法及电路

额定短路通断能力试验一般需要有一容量较大的电源，电源一般由高压交流电网经冲击变压器转换成相应的试验电压供交流电器做通断能力试验。而直流电器的通断能力试验的电压一般由上述交流试验电源再经大容量晶闸管整流器装置供给。

额定短路接通和分断能力试验电路如图 5.8-20 所示。

四级电器可按三级电器的试验电路 [图 5.8-20 (c)] 进

行试验，但中性极或不用极应接至框架，如果四极相同，则可在任意相邻三极上进行。

在图 5.8-20 中，可调负载 R 与 L 可以设置在电源电路的高压侧，也可在电路的低压侧，合闸开关 Q 设置在电路的低压侧。在图 5.8-20 (b) 中 TV1 和图 5.8-20 (c) 中 TV1、TV2、TV3 都可以改为连接在相与中性点间。在图 5.8-20 (b) 和图 5.8-20 (c) 中，如电器指定用于相接地系统或者此电路用于四极电器的中性极与相邻极试验，FU 应接至电源一相。在直流情况下，FU 应接至电源的负端。

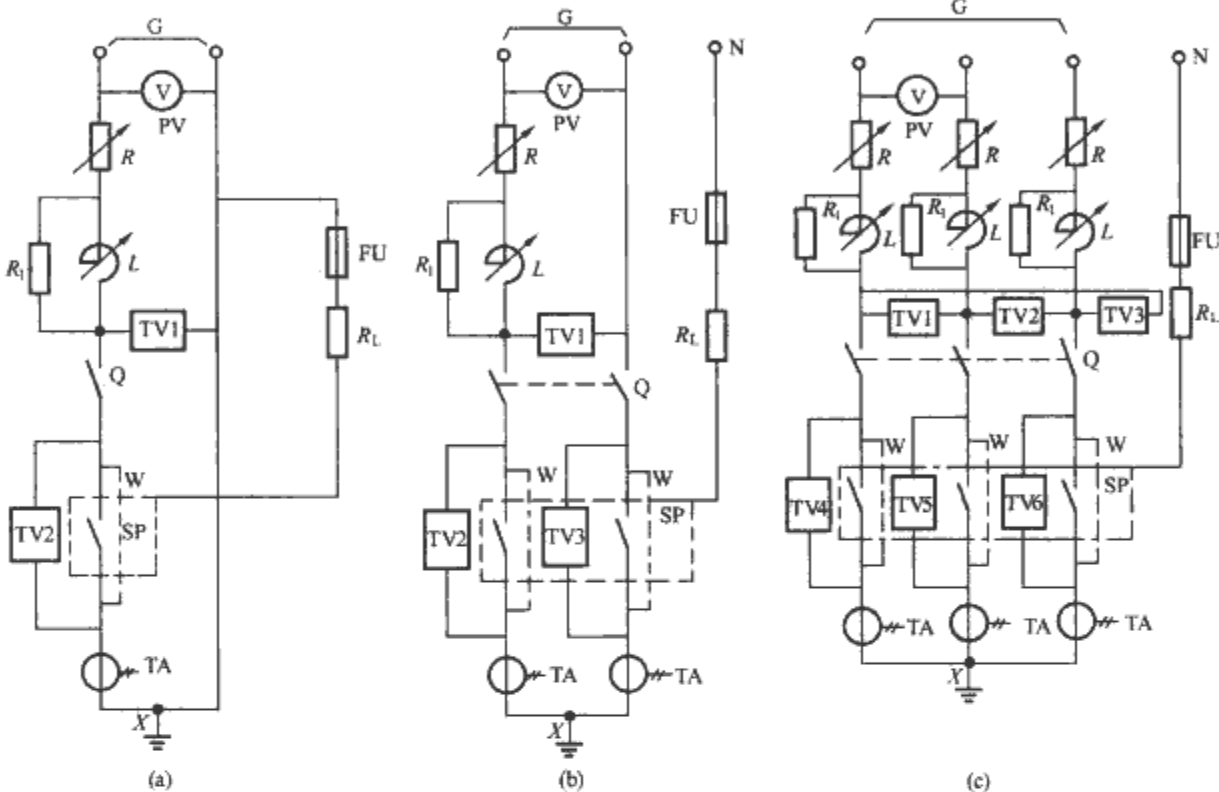


图 5.8-20 短路接通和分断能力试验电路图

(a) 单极电器的单相交流或直流试验电路图；(b) 两极电器的单相交流或直流试验电路图；
(c) 三极电器的三相交流试验电路图

G—电源；V—电压表；TV1~TV6—电压互感器；Q—合闸开关；N—电流中性点或人工中性点；FU—熔断器；
 R_L —限制故障电流的电阻；SP—被试电器（包括连接电缆）；W—整定用临时接线；TA—电流互感器；X—接地点
（仅一点接地）； R 、 L —可调负载电阻器和电抗器； R_1 —分流电阻

6.3 常用试验设备

低压电器短路试验的主电路由电源设备、负载阻抗、断路器和隔离开关等组成，为组合式结构。可根据需要进行组合连接。

随着计算机技术的发展，低压电器短路试验过程中的数据记录可以由试验数据采集系统来自动完成。

试验数据采集系统由信号传感器（空心电流互感器、桥式分压器）、隔离放大器、数据采集模块和微型计算机等组成，其组成原理图如图 5.8-21 所示，图中仅表示一相试验

测量电路。

试品电压信号（电源 U_{ab} 、 U_{bc} ）经过桥式分压器降低到适当电压值后再传送到隔离放大器的输入端（ U_a —1 号， U_b —2 号， U_c —3 号， U_{ab} —4 号， U_{bc} —5 号）；试验电流信号经空心电流互感器（积分放大器）转换成电压信号。

经过隔离放大器整理后的试验电压和空心电流互感器的电流信号经数据采集模块将模拟信号输入至 A/D 转换通道，将试验的模拟波形信号转换成数字信号并通过 GP-IB 接口传输到计算机，由数据采集系统的控制和分析软件进行数据处理（可以编制适当的计算语句），用于屏幕显示及报告打印；同时，波形的计算结果可以在计算机屏幕或报告中给出。

(1) 信号传感器。

1) 空心电流互感器。空心电流互感器（积分放大器）的作用是将试验电流的信号转换成电压信号取出来。它与主电路是完全隔离的，并有多挡量程供选择，用户可根据试验电流的大小选取合适的量程范围。其安装方式非常方便，只需套在被测电流的导体上即可。

2) 桥式分压器。桥式分压器的作用是将试品两端的电压信号衰减至接近零电位，一般的衰减倍数为 400 : 1，前端电阻值为 40k Ω （功率需大于等于 10W），末端的取样电阻为 100 Ω （最好用 2 只 200 Ω 电阻并联，这样一来，即使有

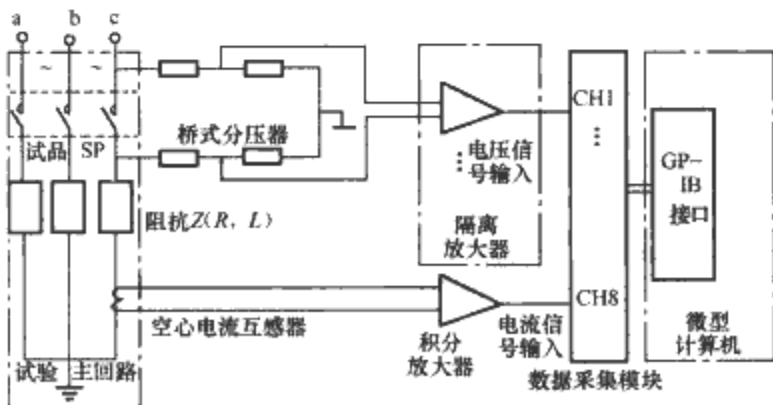


图 5.8-21 低压电器试验数据采集系统组成原理图

一只电阻开路也不会造成高电位引入放大器)。购来的电阻应先进行通电老化处理(在额定功率下通电 48h 以上),然后测量每个电阻的阻值。每个桥式分压器的两个桥臂的电阻需配对选用,其对边电阻值(平衡度)的误差应不超过千分之一。

(2) 隔离放大器。隔离放大器的作用是将分压器来的双端信号转换成数据采集模块可以接收的单端信号,并可以进行适当的信号放大或衰减,同时其隔离作用可以抗共模输入电压并将输出电压归并为单端信号。

(3) 数据采集模块。数据采集模块硬件有多个插件口供用户选择符合低压电器试验要求的采集卡。通过配置触发功能,可以采集到各种复杂的信号波形。采集到的波形数据实时经过 GP-IB 接口传输至计算机供分析处理。

(4) 数据采集控制软件。将数据采集控制软件装入微型计算机,在 Windows 环境下工作,其作用是控制采集模块各通道的工作以及用于显示所采集试验波形,并可以对波形进行简单测量。所采集的波形数据以文件的形式进行保存和打开操作。采集模块各通道的特性均可以通过此软件设置为所需要的值;可用特定的名称确定每个通道的名字以便识别,每个通道可以有其自己的技术单位刻度(名称、范围、偏置、单位/每伏)。控制软件允许确定多个窗口用于显示波形数据,每个窗口允许显示多条波形轨迹。同时每个窗口可以有自己的放大(细化)窗口,用于仔细观察各个波形的局部细节。此外,每个窗口可以使用游标对波形的幅值、时间值进行简单测量。

窗口内有控制键用于起动(Start)、人工触发(Manual Trigger)、中止(Abort)数据采集,还可显示数据采集板的目前状态。此窗口的菜单条用于设置采集板的各项特性和进行文件管理。通过此窗口还可以调用多个显示窗口,用于实时波形的显示。一般在数据采集时只要打开数据采集软件就可以单独进行数据采集、存储工作。

操作该数据采集系统的关键是如何来设置数据采集软件中的具体参数,主要有:

- 1) 试验任务。如通断能力试验或电寿命试验等。
- 2) 试验回路。试验回路可以有多个,需要考虑的是交流或直流,单相还是三相试验,单相试验试品是单极还是二极,试验电流、电压的参数是多少等内容。
- 3) 测试传感元件。测试空心互感器、分压器等。

正确设置参数后的试验数据采集和保存是最基本的操作。

7 材料试验及设备

7.1 绝缘材料相比漏电起痕指数 (CTI) 试验及设备

电器的固体绝缘材料表面在电场和电解液的共同作用下,会逐渐形成导电通路,产生漏电痕迹。电器的固体绝缘材料,要求在潮湿条件下测定其相对漏电特性,这一特性指标称作绝缘材料的“相比漏电起痕指数”或“CTI”,其定义是材料表面能经受住 50 滴电解液而没有形成漏电痕迹的最高电压值。绝缘材料的 CTI 值是确定爬电距离所必需的数据。

绝缘材料相比漏电起痕指数测试设备是测定绝缘材料在潮湿条件下漏电特性的设备,用以测定绝缘材料的相比漏电起痕指数,常称为 CTI 测定设备。

本试验按固体绝缘材料在潮湿条件下相比漏电起痕指数的测定方法进行。

7.1.1 试验条件

(1) 试样。试样表面应清洁,没有灰尘、脏物、指印、油脂、脱膜剂或其他可能影响试验结果的杂质。试样不需处理,只需用干滤纸或纱布擦净。清洁试样时应防止引起材料溶解、软化、腐蚀或其他损伤。

试样表面应平整、无伤痕,在特殊情况下,为了得到平整表面可以进行研磨。其表面面积应使试验时液体不会从试样边缘流出,尺寸应不小于 $15\text{mm} \times 15\text{mm}$ 。试样厚度应不小于 3mm ,对厚度小于 3mm 的试样应当用两块或多块叠起来试验。

(2) 试验设备。

1) 设备原理。设备结构原理框图如图 5.8-22 所示。

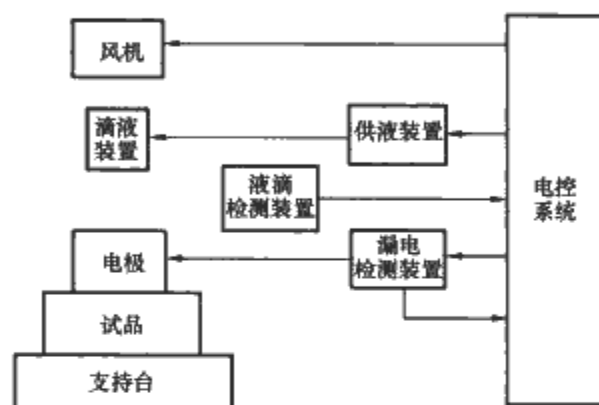


图 5.8-22 绝缘材料 CTI 测试设备结构原理框图

设备中的供液装置将规定浓度的氯化铵溶液供给滴液装置,滴液装置按规定的時間间隔(30 ± 5) s 形成一定大小的液滴($20_0^{+3} \mu\text{m}^3$ 每滴),滴到两电极间的绝缘材料(试品)表面,液滴的数量由液滴检测装置检出后送至电控系统,以便对供液装置进行控制。

铂电极以一定的压力 [$(1.0 \pm 0.05) \text{N}$]、角度(60°)、距离 [$(4.0 \pm 0.1) \text{mm}$] 将试品压的支持台上,电极间加上规定的电压并由漏电检测装置检出其漏电流,当漏电流在规定范围内时系统维持对电极的供电。当漏电流超标时电控系统应切断电源和停止供液。

所以,设备是用人工滴液的方法在试品表面制造一个模拟潮湿状态的漏电环境,再测定在规定漏电流(0.5A)范围内施加给电极的电压值,以确定试品的相比漏电起痕指数,进而决定材料对使用场合的适用性。

电控系统应给电极提供一个 $100 \sim 600\text{V}$ 连续可调的正弦波电源,输出电流应在 $0.5 \sim 1\text{A}$ 范围内。

设备应符合 GB 4207 的要求。

2) 电极。电极截面为 $2\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的两个矩形铂极。电极的一端边缘切成 30° 的斜面,斜面的刃稍微磨圆,如图 5.8-23 (a) (单位 mm) 所示。

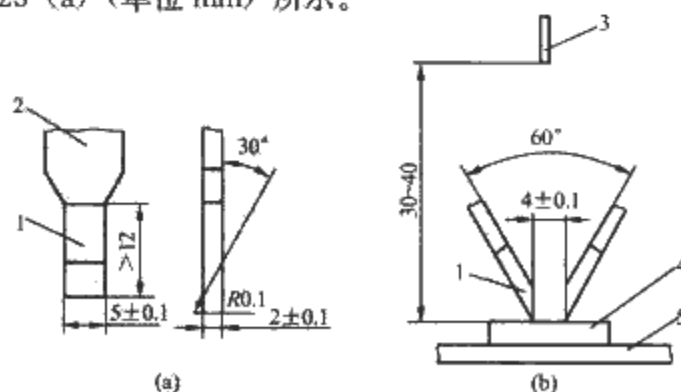


图 5.8-23 CTI 试验电极
(a) 电极; (b) 电极配置

1—铂电极; 2—黄铜杆; 3—滴液针; 4—试样; 5—支撑板

两个电极应在与水平试样表面相垂直的平面内对称地安放，其间的夹角为 60°，两电极正面相对并相距 (4 ± 0.1) mm，如图 5.8-23 (b) (单位 mm) 所示。每个电极施加于试样表面的力为 (1 ± 0.05) N。电极与试样安放在如图 5.8-24 所示的试验设备上。

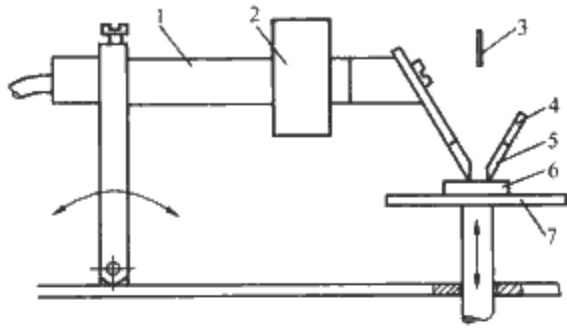


图 5.8-24 CTI 试验设备
1—绝缘管；2—重物；3—滴液针；4—黄铜杆；
5—铂电极；6—试样；7—支撑板

如果电极与试样的相对方向对试验结果有影响时，应采用测得的 CTI 为最小的那个方向。

3) 试验电路。试验的原理线路图如图 5.8-25 所示。施加的试验电压频率为 48~60Hz，波形应基本上是正弦波，可在 100~600V 之间连续调节。其电源功率应不小于 0.5kVA。可调电阻应能调节两电极间的短路电流到 (1 ± 0.1) A，并且在此电流值下，电压表指示的电压下降值应不超过 10%。在试验回路中，过电流继电器应在 0.5A 或更大的电流时延时 2s 动作。

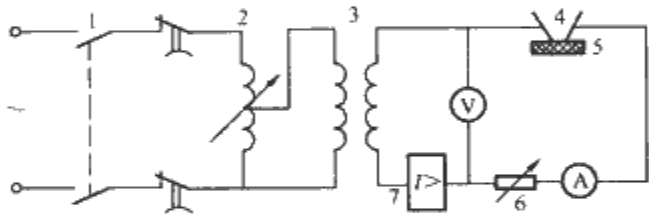


图 5.8-25 试验原理线路图
1—开关；2—调压器；3—变压器（提供 100~600V 交流电压）；
4—电极；5—试样；6—可调电阻器；7—延时过电流继电器

4) 滴液装置。试验溶液应从 30~40mm 的高度滴到两电极中间的试样表面上。液滴滴落的时间间隔为 (30 ± 5) s，在某些特殊情况下，滴液时间间隔允差 ± 5 s 太大，将影响试验结果，这时可改为允差 ± 1 s。液滴大小为 $20_0^{+3} \mu\text{m}^3$ 。每次试验前要擦净滴液针并流掉 10~20 滴溶液，以保证液滴大小和溶液浓度的准确。液滴大小应定期检查，1cm³ 溶液滴出的液滴应不少于 44 滴，不多于 50 滴。对于溶液 A 可采用外径 1.2mm 的针尖直切的输血针作为滴液针。

5) 试验溶液。试验溶液按表 5.8-14 配制。试验前要在 $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的环境条件下测定溶液的电阻率。

表 5.8-14 溶液的配比			
试验溶液	100mL 蒸馏水或去离子水中加入		$(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ 时的电阻率 $(\Omega \cdot \text{cm})$
	氯化铵 $(\text{NH}_4\text{Cl})(\text{g})$	烷基苯磺酸钠 $(\text{R} \cdot \text{C}_n\text{H}_6 \cdot \text{SO}_3\text{Na})(\text{g})$	
A	0.1 ± 0.002	—	395 ± 5
B	0.1 ± 0.002	0.5 ± 0.002	170 ± 5

注 1. 漏电起痕现象随溶液电阻率的减小而加剧，也受试验溶液的化学性质的影响。
2. 离子湿润剂烷基苯磺酸钠可用丁基苯磺酸钠代替。
3. 配制溶液时，氯化铵和烷基苯磺酸钠要在 105°C 下干燥 2h。
4. 为保证溶液电阻率测量准确，需要定期用氯化钾标准溶液校正电导电极常数，电导电极应按要求进行处理。

优先选用溶液 A，如果需要侵蚀性更强的污染，则应使用溶液 B。如用溶液 B，应在 CTI 值后加一个字母“M”，例如 CTI250M。如果用了溶液 A 和 B 以外的其他溶液，则应在试验报告中说明，其结果不能用 CTI 表示。

7.1.2 试验方法

CTI 试验应在空气不流动、温度为 $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的环境条件下，采用上述试验设备和电路进行。

(1) 试验程序。每次试验时应将电极擦净。电极边缘如果已被蚀损，应重新研磨。试样应水平地放置在绝缘（或金属）支撑板上。电极按图 5.8-23 所示放置，并以规定的压力与试样表面良好接触，用量规检查两电极间的距离应为 (4 ± 0.1) mm。

接通电源，调节一个电压值，使它是 25V 的倍数。调节可调电阻，使两电极间短路时回路电流为 (1 ± 0.1) A，当试验电压不同时，可调电阻值要做相应的改变。然后使两电极间开路，对试验回路供电，同时使电解液液滴以 (30 ± 5) s 的时间间隔滴到两电极中间的试样上，直到试样发生破坏或滴下 50 滴为止。

当在试样表面两电极间的导电通路中流过 0.5A 或更大电流，过电流继电器延时 2s 动作时；或过电流继电器虽未动作但试样燃烧时，均认为已发生破坏。

(2) CTI 值的测定。调节一个预先选择好的电压值并进行试验，直到试样经受住 50 滴溶液或试样发生破坏为止。在试样的其他试验点上施加更低或更高的电压再做试验，直到得出在 5 个不同的试验点上对 50 滴溶液不发生破坏的最高电压值。如果将这个最高电压值降低 25V，在另外的 5 个试验点上再做试验时，直到 100 滴溶液试样也没有发生破坏，则这个最高电压值就是 CTI。有的材料可能满足不了后一个规定，对于这些材料要确定试样在 5 个试验点上都能经受住 100 滴溶液的最高电压值，并将这个电压值附在 CTI 中表示出来，例如 CTI425 (375)。

如果不知道材料的性能，则起始电压可选取试验范围的中间值，例如 300V。如果试样经受住 50 滴溶液，就增加电压再做试验，否则就降低电压再做试验。这个电压的增减量应是 25V 或 25V 的倍数。继续进行试验，直到获得 5 个试验点都能经受住 50 滴溶液的最高电压值。

试验时应注意以下各点：

- 1) 如果在同一试样上做多次试验，则试验点之间要有足够的间隔，使试验点上飞溅出的污物不污染其他的被试表面。
- 2) 试验时可能会遇到电解液或污染物积聚在试样表面上的凹坑或缺陷处，导致过电流继电器的动作，而不是漏电起痕所引起的，在这种情况下必须重做试验。
- 3) 因试验能产生有害或有毒的气体，因此，应采取安全措施以排除或密闭这些气体。

7.1.3 试验结果的判定

绝缘材料可按其相比漏电起痕指数 (CTI) 划分为以下四个组别：

- (1) 绝缘材料组别 I： $600 \leq \text{CTI}$ 。
- (2) 绝缘材料组别 II： $400 \leq \text{CTI} < 600$ 。
- (3) 绝缘材料组别 IIIa： $175 \leq \text{CTI} < 400$ 。
- (4) 绝缘材料组别 IIIb： $100 \leq \text{CTI} < 175$ 。

绝缘材料的 CTI 测定值应符合有关产品标准的规定。如果电器制造厂从绝缘材料制造厂或其他可靠方面获得数据确实证明绝缘材料符合电器要求的 CTI 值，也可取代绝缘材料 CTI 测定。

7.2 抗非正常热和着火危险试验及设备

低压电器的载流部件在过载或故障条件下，会产生过量的发热，对于电器中绝缘材料制成的部件，在工作中可能受到电气效应产生的正常热和非正常热，引起绝缘恶化或着火危险。这些部件在遭受非正常热和着火作用时不应使其失效或危及安全。验证低压电器抗非正常热和着火危险的试验要模拟热源或点火源所产生的热效应，除非产品标准另有规定，一般选用以灼热丝为模拟主体的试验设备，按灼热丝试验方法 GB 5169《电工电子产品着火危险试验》进行。着火危险试验设备可模拟热源所产生的热效应或着火情况，考核部件在此情况下的失效和危及安全的程度，评定绝缘件的符合性。

7.2.1 试验依据

灼热丝试验的严酷等级由灼热丝顶部的温度和它施加在试验样品上的持续时间来决定，严酷等级规定见表 5.8-15。

表 5.8-15 严酷等级		
灼热丝试验温度 (°C)	允差 (°C)	试验持续时间 t_n (s)
550	±10	30±1
650	±10	
750	±10	
850	±15	
960	±15	

注 如有关标准规定，其他严酷等级也可使用。

支持或固定载流部件的绝缘材料制成的部件，应采用灼热丝顶端试验温度为 960°C 或 850°C 的严酷等级。不支持载流部件和接地部件的绝缘材料制成的部件（包括与它们接触的绝缘部件），优先采用灼热丝顶端试验温度为 650°C 的严酷等级。保护接地导体不作为载流部件考虑，因此支持保护接地导体的绝缘部件灼热丝顶端试验温度也按 650°C 考核。

7.2.2 试验条件

(1) 试品。

1) 试验样品应尽可能完整的产品、部件、零件或元件。必要时可将外壳全部或部分取掉进行试验。

2) 如果试验不能在产品内的部件、零件或元件上进行时，可在单独相应的部件、零件或元件样品上进行。

3) 如果试验不能在完整的试验样品上进行时，可割下适当的部分进行。

(2) 试验设备。灼热丝试验在专用的试验设备上进行，对试验设备有如下要求：

1) 灼热丝是用直径为 4mm 的镍铬 (Cr20Ni80) 丝制成规定尺寸的环，成形时需注意避免在环的顶部产生细裂纹。

2) 用直径为 0.5mm 的不锈钢铠装细丝热电偶测量灼热丝的温度，偶丝线材为镍铬和镍铝，其焊接点置于铠装套内，铠装套要能耐受至少 960°C 的温度。灼热丝和热电偶的尺寸及布置如图 5.8-26 (单位 mm) 所示，热电偶安放在灼热丝顶部直径为 0.6mm 的小孔内 (如图 5.8-26 中 Z 的放大部分所示)。热电偶的热电特性应符合线性要求，热电偶的冷端应置于冰水混合物中，或采用温度补偿法以获得可靠的数据。测量热电动势的仪器要求精度为 0.5 级。将灼热丝顶部加热至温度为 960°C，所需的电流应在 120~150A 之间。

3) 试验设备应使灼热丝保持在一个水平面上，它对试验样品施加 (1±0.2) N 的力，在灼热丝和试验样品相对移动时应保持此压力值。试验设备结构示意图如图 5.8-27

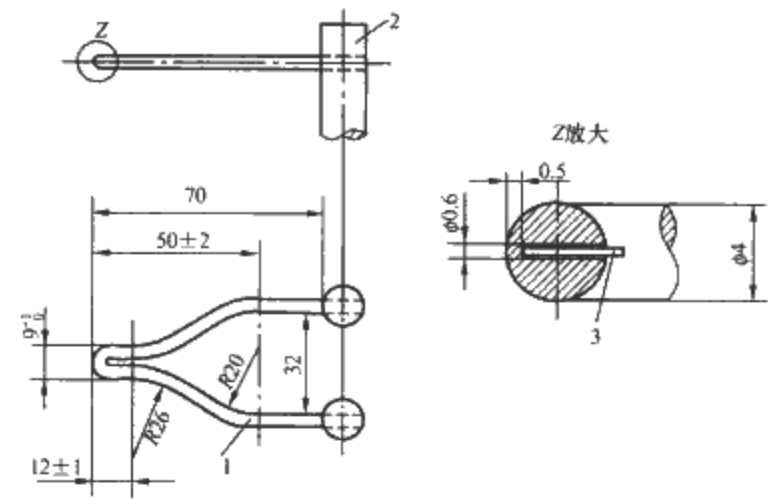


图 5.8-26 灼热丝和热电偶的布置
1—灼热丝；2—螺栓；3—热电偶

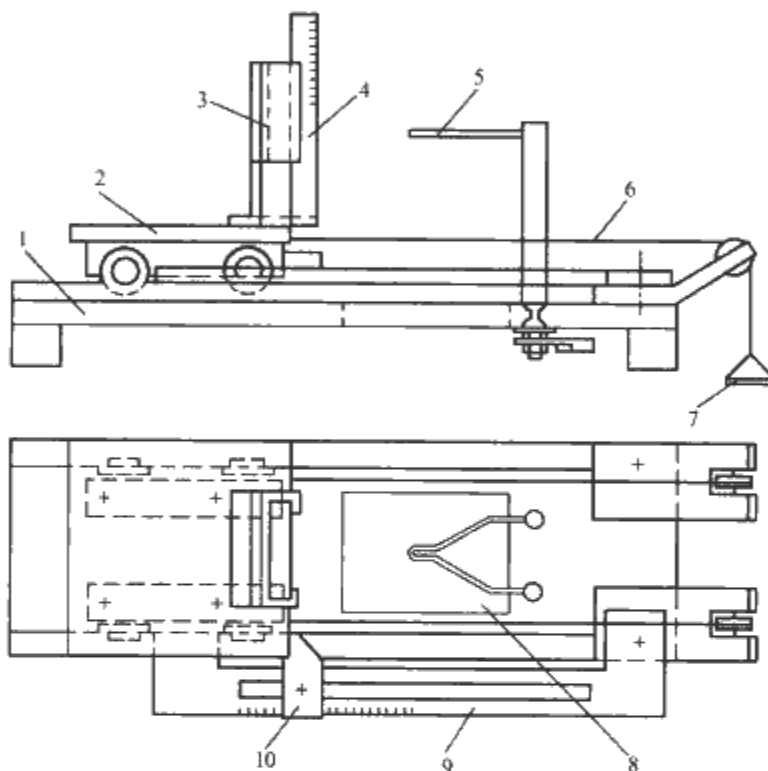


图 5.8-27 试验设备结构示意图
1—底板；2—小车；3—定位夹；4—火焰测量标尺；
5—灼热丝；6—拉紧绳索；7—重物；8—底板开孔，
为试验样品上落下颗粒用；9—穿透度测量标尺；
10—定位器

所示。

灼热丝着火危险试验设备原理框图如图 5.8-28 所示。

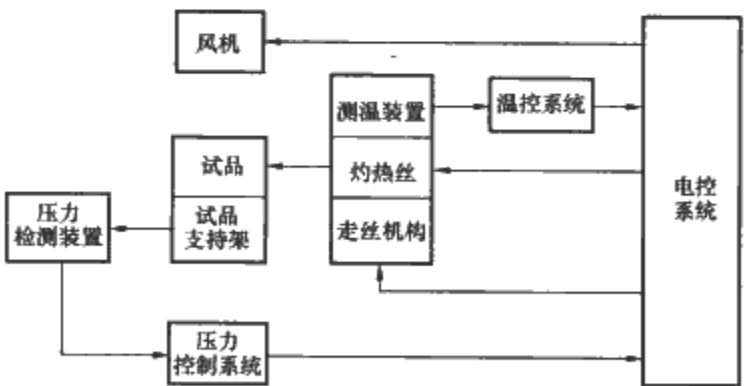


图 5.8-28 灼热丝着火危险试验设备结构原理框图

灼热丝固装在走丝机构上，灼热丝由电控系统对其进行加热，温度由测温装置进行测量并送至温控系统与整定值相比较，比较的结果送至电控系统，确定对灼热丝加热与否。

试品固定在试品支持架上，灼热丝对试品的切入压力传递至压力检测装置上，压力检测装置检测到的压力信号送至压力控制系统与规定值相比较并将结果送至电控系统，以控

制走丝机构前进或后退,从而保持切入压力的稳定。

通风机是将试品受热或着火时产生的烟气排出箱外。着火火焰的高度可通过标尺来测量。

在电器产品试验中,灼热丝顶端温度应能调整到 650°C 和 960°C 。加压时应能调整为 $(1.0 \pm 0.2)\text{N}$, 加压也可用配重来施加。

设备应符合 GB 51694 的要求。

4) 为了评定燃烧的蔓延性,例如从试验样品上落下的燃烧或灼热颗粒所引起的燃烧蔓延,可在试验样品底下放一层铺底层。铺底层一般由试验样品周围或底下的材料或元件所组成,它至试验样品底下的距离应与产品实际使用的情况一致。

当产品的部件或零件单独进行试验时,除有关标准另有规定外,还采用一张绢纸覆盖厚约 10mm 的白松木板作铺底层,它放在离试验样品施加火焰部位的底下 $(200 \pm 5)\text{mm}$ 处。绢纸是一种柔软而强韧的软质包装纸,密度在 $12 \sim 30\text{g}/\text{m}^2$ 范围内。

5) 热电偶的校准应在 960°C 下进行,标准方法是用纯度为 99.8% 、厚 0.06mm 的 2mm^2 正方形银箔放在灼热丝顶部的上表面,当灼热丝加热到 960°C 时银箔熔化。

在更换热电偶或接头时必须重复校准,并应保证热电偶能随灼热丝顶部因发热伸长所产生的移动。

7.2.3 试验方法

(1) 预处理。除有关标准另有规定外,试验开始前,试验样品应在温度为 $15 \sim 35^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 $45\% \sim 75\%$ 的大气中处理 24h 。

(2) 初始测量。试验样品用目测检查,如有有关标准规定时,测量物理和电气参数。

(3) 试验程序。

1) 试验进行前必须对以下各点采取人身安全保护措施:燃烧或爆炸的危险;烟或有毒生成物的吸入;有毒的残余物。

2) 试验样品的固定不应由于支撑或紧固而产生明显散热,试验样品与灼热丝相垂直,灼热丝顶部应施加到试样截面最薄或其他最易着火的部位,并尽量施加在平的表面上,而不应加在凹沟、盲孔、窄槽或尖的边缘上,但离试验样品上部边缘最好不小于 15mm 。

3) 如果是从完整的产品、部件、零件或元件上取下全部或部分外壳进行试验时,必须确保试验条件在形状、气流、热应力效应和可能发生的火焰以及灼热或燃烧的颗粒落到试验样品附近的情况应无显著差异。

4) 灼热丝通电加热到表 5.8-15 规定的温度,由校准的热电偶进行测量。必须注意,应确保在加热或校准时试验样品不受热辐射的影响,例如,可保持一定的距离或使用适当的屏幕。

5) 使灼热丝的顶部与试验样品相接触,持续时间 t_c 。按表 5.8-15 规定,在该期间保持加热电流,此后灼热丝与试验样品慢慢地分开。要避免试验样品再被加热或气流对试验结果的影响。灼热丝压入试验样品的深度应限制为 7mm 。

一般在一件样品上进行试验,如果对试验有疑问,则可在另外两件试品上重复进行试验。

(4) 观察和测量。在对试验样品施加灼热丝和试验结束后 30s 的时间内,要对试验样品和周围的零件以及放在它下面的铺底层进行观察并做如下记录:

1) 从顶部施加灼热丝开始到试验样品或它下面的铺底层起燃的持续时间 t_i 。

2) 从顶部施加灼热丝开始到火焰熄灭的持续时间 t_e 。火焰可能在施加期间或以后熄灭。

3) 火焰的最高高度。起火开始时,可能产生高的火焰,为时约 1s ,这种火焰不计在内。火焰的高度是指当灼热丝施加在试验样品上时,由灼热丝上缘至可见火焰顶部的垂直距离。

试验样品在试验后应进行目测检查物理损坏。如有有关标准规定时,还应测量机械、电气参数。

7.2.4 试验结果的判定

除非有关标准另有规定,否则试验样品符合下列两种情况之一者,可认为经受住了灼热丝试验。

1) 无火焰或不灼热。

2) 如果试验样品、周围的零件或下面的铺底层产生燃烧或灼热,但在灼热丝移去后 30s 内熄灭,即 $t_e \leq (t_a + 30)\text{s}$,而周围零件或下面的铺底层又未完全烧着。

当铺底层使用了绢纸覆盖的松木板时,绢纸不应起火,松木板不应烧焦。

7.3 耐热性能试验及设备

电器应具有在正常工作条件中可能达到的最高温度作用下不致产生有害损伤的能力。

耐热性能试验应在整个电器上和电器的部件上进行,如果验证部件有困难,则可在由绝缘材料制成的试样上进行。以下试验方法在电器运行于周围空气温度上限为 $+40^{\circ}\text{C}$,年平均值不超过 $+20^{\circ}\text{C}$ 的条件下适用。

电器耐热性能试验设备由加热箱(室)和试球或试指组成。在受热试件实施钢球压力时,可采用图 5.8-29 所示的设备。

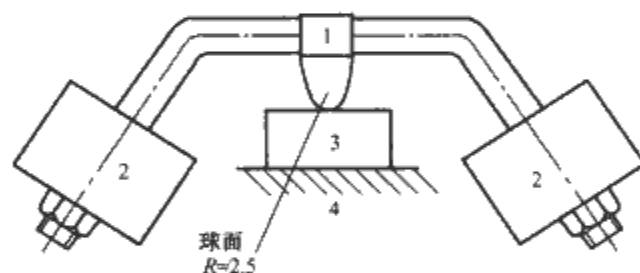


图 5.8-29 球压试验设备

1—球面压头; 2—配重(总重 20N);
3—试样; 4—刚性基面

7.3.1 电器的耐热试验

被试电器在放入加热试验室(箱)以前,应存放在室温条件下不少于 4h 。除非另有规定,否则被试电器应放置在温度为 $(100 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的加热试验室(箱)中足够长时间,使其达到热平衡,但不少于 1h 。然后从试验室(箱)中取出,使其冷却到接近室温。

试验后检查被试电器,应无损害其继续使用的任何变化。对于具有外壳防护要求的电器,还要用验证外壳防护等级的标准试指施加一不超过 5N 的力,作用于电器在正常使用时容易进入的外壳表面。电器按正常使用条件安装,试指不应进入至接近壳内带电部件和触及壳内运动部件。还要检查电器标志,标志应清楚。

7.3.2 部件的耐热试验

支持或固定载流部件和接地部件的绝缘材料制成的部件,除非另有规定,否则应在温度为 $(125 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 下承受球面压力试验。不支持载流部件和接地部件的绝缘材料制成的部件(包括与它们接触的电器外部绝缘部件),除非另有规定,否则应在温度为 $(70 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 或 $(40 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 加最高温升

(取其大者)下承受球面压力试验。最高温升由温升试验中与其接近的有关部件实测值来确定。

球面压力试验时,被试部件的表面放置在由钢性平板支持的水平位置,钢板厚度至少为 5mm。钢球直径为 5mm,球上垂直施加在被试部件表面上的力为 20N。球面压力试验在温度为规定值的加热试验室(箱)中进行,持续时间为 1h。

试验后移去钢球,把试品立即浸入冷水中,在 10s 内应冷却至接近室温。然后测量钢球沉入试品所形成凹痕的直径,应不超过 2mm。

当不能用完整的部件进行试验时。应取其厚度至少为 2mm 的合适部分进行高温下的球面压力试验。厚度不足 2mm 的部件也可用数层叠置而成。

7.3.3 材料的耐热试验

绝缘材料的试样厚度至少为 2mm。材料的耐热试验方法同部件的耐热试验。

如果电器制造厂从绝缘材料制造厂或其他可靠方面获得数据,确实证明绝缘材料符合以上要求的耐热性能时,也可取代材料耐热验证试验。

8 环境试验设备

环境试验设备是为试验提供一个特定的环境条件,以模拟产品在实际使用中可能碰到的环境状况,从而验证产品、材料在该条件下性能的保持能力。就环境性质可分为气候环境、生物环境、工作环境等。

8.1 高低温试验箱

高低温箱是模拟高温或低温环境条件的设备,广泛应用于高、低温储存,高低温动作特性试验中。高低温箱是将高温箱和低温箱合并制成的综合功能设备,其结构原理框图如图 5.8-30 所示。

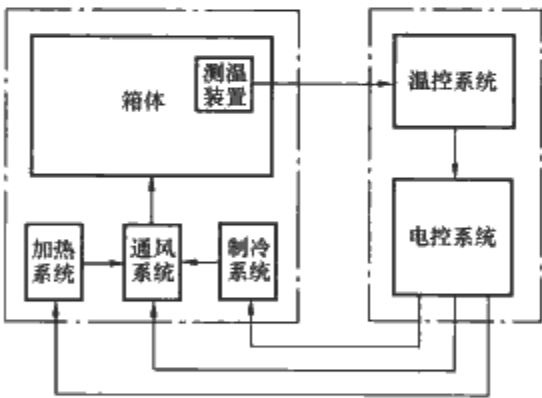


图 5.8-30 高低温箱结构原理框图

高低温箱的箱体用隔热材料作夹层,它通过测温装置测到温度信号送至温控系统同整定的温度值相比较,将比较的结果通过电控系统分别控制加热系统进行加热或制冷系统进行降温,以保证箱内工作室温度恒定在要求的参数值。通风系统是为箱内进行冷热交换和使箱内温度均匀之用。

测温装置可用电接点温度计、热电偶、铂电阻等。温控系统可用电接点、温度自动化仪表、计算机等。有的还配有温度自动记录机构,也可用一台计算机实现对多台高低温箱的群控。

高低温箱还设有超温后备保护、制冷系统超压保护功能。有的高温箱体和低温箱体分开设置,在试品转移时用自动传送装置可迅速地将高温环境和低温环境互换,以满足升降温速率的要求。

按 GB/T 10592《高低温试验箱技术条件》规定,高低温箱应符合下面技术要求:

- 高温温度及偏差, $\leq (200 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。
- 低温温度及偏差, $\geq (-65 \pm 3)^\circ\text{C}$ 。
- 温度均匀度,不大于 2°C 。
- 温度波动度,高温 $\leq \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、低温 $\leq \pm 1.0^\circ\text{C}$ 。
- 在试验中,温度和偏差范围以满足产品标准规定的条件为准。

8.2 湿热试验箱

湿热试验箱是人工气候环境设备之一。它常用于考核产品在湿热条件下的适应性和可靠性,如恒温恒湿试验、交变湿热试验、通电工作试验等。它也是通称的“三防”设备之一。

湿热试验箱结构原理框图如图 5.8-31 所示。

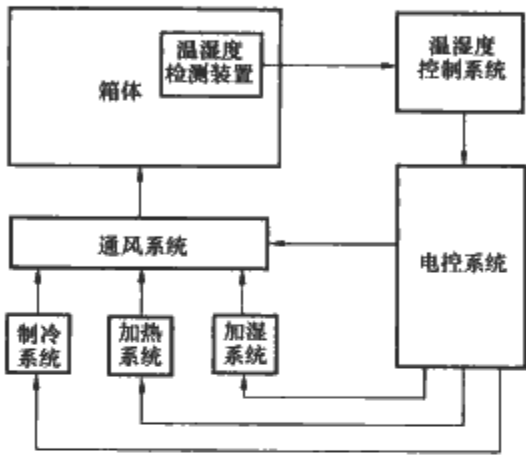


图 5.8-31 湿热试验箱结构原理框图

如图 5.8-31 所示,湿热箱由制冷系统对工作室进行降温,加热系统进行升温,加湿系统进行加湿,降温进行降温。温度检测多采用温度计、铂电阻,湿度测量则是根据干、湿温度计或干、湿铂电阻测试数据的差值计算出湿度。

加湿一般采用锅炉产生蒸汽来进行,温湿度控制多采用计算机或智能化仪表实现。在进行交变湿热试验时,将标准规定的温湿度曲线存入计算机,通过计算机对箱内温湿度的采样、比较、处理、控制,可使箱内温湿度按规定的曲线运行,减少人工控制产生的偏差。

湿热箱应符合 GB/T 10586《湿热试验箱技术条件》规定的要求。湿热箱技术参数一般在以下范围:

- 温度调节和波动范围, $[(20 \sim 60) \pm 0.5]^\circ\text{C}$ 。
- 湿度调节和波动范围, $(80\% \sim 100\%) \pm 2\%$ 。
- 温度均匀性, $\leq 1^\circ\text{C}$ 。
- 湿度均匀性, $\pm 2\%$ 。
- 升温时间, 1.5~3.5h。
- 降温时间, 3~6h。
- 风速, $\leq 1\text{m/s}$ 。
- 湿热箱也可以用一台计算机对多台设备进行群控。

8.3 霉菌试验箱

霉菌试验箱是人工气候环境试验设备之一,也是通常称为“三防”试验设备之一。它主要用于在湿热带使用的电器产品的长霉试验和抗霉菌材料的性能试验。

霉菌试验箱为霉菌提供一个生长、发育的良好的温度、湿度,在该生物气候环境条件中,在试品种入菌种的情况下,经过一定周期的生长,考核和评定试品抗御霉菌生长的能力和霉菌引起的表面变化程度及其对试品性能的影响。

霉菌试验箱结构原理框图如图 5.8-32 所示。

水箱内的水经加热后由水泵注入工作室以保持室内的湿度;风箱内的空气经加热或冷却后由风机送入夹层以调节工

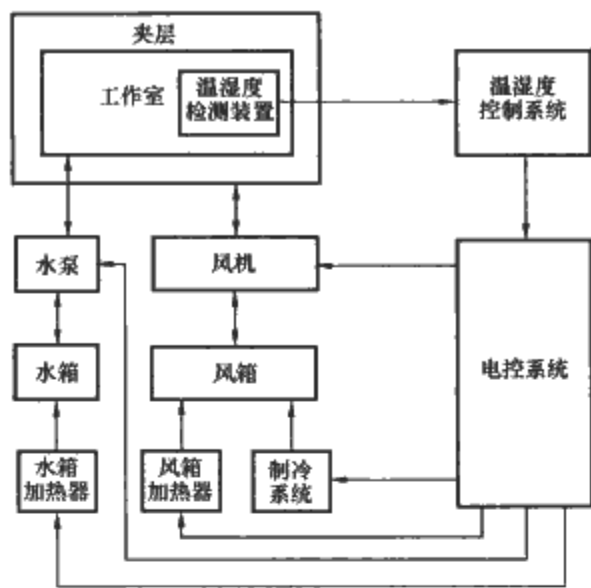


图 5.8-32 霉菌试验箱结构原理框图

工作室的温度；工作室内的温湿度经检测装置检出后，由温湿度控制系统发出相应命令，通过电控系统执行相应的动作以完成对温湿度的调控。

霉菌试验箱应符合 GB/T 10588《长霉试验箱技术条件》的要求。试验箱的温度应适应大多数霉菌的平均最佳温度，一般在 25~30℃ 之间，考虑一定的裕度，可在 25~40℃ 间调节，相对湿度在 85%~100% 范围，工作室空气静止密闭，不应有辅助的空气循环，空气相对湿度应接近饱和。

霉菌试验箱主要技术参数：

- 温度，(29±1)℃。
- 温度均匀度，≤1℃。
- 温度波动度，每小时不大于±0.5℃。
- 相对湿度，≥90%。
- 风速，≤1m/s。

霉菌试验应避免菌种外泄，因此，箱门、通风管、制冷系统管路均应密闭可靠，不应泄漏。试验箱还应装设温湿度指示和记录，以监视系统的运行。

8.4 盐雾试验箱

盐雾试验箱也是人工气候环境试验设备之一，是“三防”设备中的一种。它适用于为湿热带使用的产品、零部件进行耐盐雾性能试验提供环境条件。

盐雾试验箱是模拟海洋性气候的环境条件，以考核试品在一定时间内抗盐雾腐蚀性能的设备。

盐雾试验箱结构原理框图如图 5.8-33 所示。

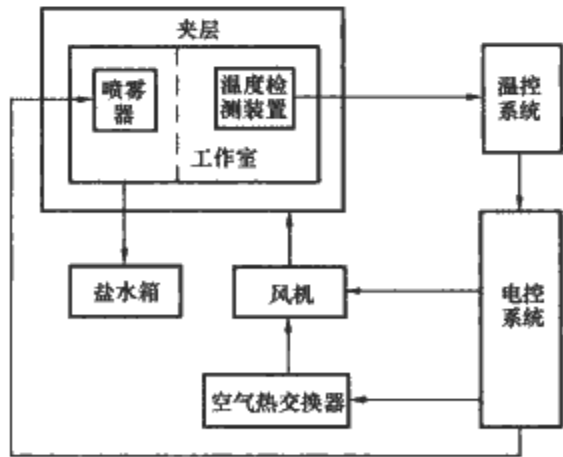


图 5.8-33 盐雾试验箱结构原理框图

从图 5.8-33 看出，盐水通过喷雾器在工作室内形成盐雾；热交换器内，空气经过加热或冷却（水冷）后通过风机送入夹层调节工作室温度。温度的检测通过电接点温度计

或其他检测设备进行，检测的温度信号通过温控系统比较后命令电控系统执行升温或降温动作，使工作室温度稳定在要求范围。喷雾器可按需要执行连续喷雾或周期喷雾动作，工作室积累的盐液经管道流入盐水箱。

喷雾的方法可分为离心式喷雾和气流式喷雾。在气流式喷雾系统中，由空气压缩机产生的压缩空气经水汽分离和过滤后进入饱和器预热，预热后的压缩空气由电磁阀控制经喷嘴喷出，利用喷嘴喷射空气时的虹吸作用，将经加热后的盐水同时喷出并形成盐雾，在喷射系统中，箱内温度通过空气预热、盐水加热和箱体加热来实现，一般不再设置夹层空气加热。

盐雾试验箱应符合 GB/T 10587《盐雾试验箱技术条件》的要求。其技术参数一般为：

- 标称温度及偏差，(35±2)℃。
- 温度均匀度，≤2℃。
- 温度波动度，≤0.5℃。
- 盐雾沉降率，1.0~2.0mL/(h·80cm²)。

盐雾试验箱门、盖应密闭可靠，不能有盐雾逸出，温控系统应能可靠调节箱内温度并有显示，试验箱还应设有盐雾沉降量指示装置。

9 电磁兼容试验及设备

利用电能进行工作的各种电气设备和电子设备，是工作在一定环境之中的，而且伴随着电磁能量的转换，往往对周围环境中的其他用电设备发生影响，与此同时，电子设备本身也会受到所处环境的各种电磁干扰。电磁兼容性（Electromagnetic Compatibility，简称 EMC，一般称为抗干扰）是指干扰可以在不损害信息的前提下与有用信号共存。形成电磁干扰的条件为：①向外发送电磁干扰的源——噪声源；②传播电磁干扰的途径——噪声耦合和辐射；③承受电磁干扰（对噪声敏感）的客体——受扰设备。

在低压电器产品领域，我国等同采用 IEC 60947《低压开关设备和控制设备》系列标准，修订了 GB/T 14048《低压开关设备和控制设备》系列标准，这些标准中都增加了 EMC 的要求。

电磁兼容性（EMC）包括电磁干扰（EMI）和电磁敏感度（EMS）两部分，其中电磁干扰（EMI）也称电磁发射，电磁敏感度（EMS）也称电磁抗扰度。限制电子设备或系统的 EMI 的目的是保护电子设备或系统正常工作时所处的电磁环境；提高电子设备或系统的 EMS 能力，是为了确保电子设备或系统的工作性能免受周围电磁环境的影响。低压电器的电磁兼容试验就是在这两方面进行的，即电磁发射试验和电磁抗扰度试验，而其中，电磁抗扰度试验尤为关键。以下对电磁发射试验及设备进行简单叙述，重点放在电磁抗扰度试验及设备上。

首先，看看对电磁发射试验设备的要求。不管电磁发射试验采用什么形式，都必须考虑到一些共同的因素。试验场地必须确定下来，比如屏蔽室、开阔试验场或者电波暗室。另外，还需要某种形式的转换器或检测器件，比如天线、电流探头或者一个人工电源网络（或称电源阻抗稳定网络），它接收从待测设备发射出来的信号，再把这个信号传送给接收机，接收机检测并显示出干扰信号的电平。接收机必须足够灵敏，能读出低电平的信号，并且不发生失真，以便找出打算检取的信号。此外，接收机的带宽和检波特性也必须确定。所有上述因素都必须满足要求才能确保试验的结果是有效和可重复的，而且能同在另一地方测量的结果相比较。

其次，对电磁抗扰度试验设备的要求，它的关键部件是

一个高功率的信号源。从现时标准的执行角度看,除了传统的高频辐射和传导试验外,考虑到众多电子设备的数字化、小型化和低功耗化。高压脉冲已成为电磁抗扰度试验的一个重点,所以除了高频连续波的信号源(通常由信号发生器和高频功率放大器组成)和试验必须配备的信号发送天线或信号注入网络外,还要配备专门用于产生高压脉冲的信号源,如雷击浪涌发生器、脉冲群发生器、静电放电测试仪等,以及注入脉冲信号所必须的耦合/去耦网络和电容耦合夹等。所有上述试验设备及完成试验的必要配置都必须规范才能使试验结果有重复性和可比性。

从保证试验结果的重复性、可比性和可信性出发,除了有必须的试验设备及其配件外,试验场地也是一个重要方面。

作为脉冲性质的抗扰度试验,因为信号源的幅度较强,信号不会淹没在背景噪声之中,所以对试验场地没有太高的要求,在一般的实验室中即能进行。

对于电磁发射和高频辐射与高频传导的抗扰度试验,则对试验场地的要求较高。其中传导性质的电磁发射和高频传导试验一般可在屏蔽室内进行。对于设备从电源引出的辐射发射,如利用吸收钳法进行试验时,通常也可在屏蔽室内进行。但是对于一般意义上的电磁辐射发射试验(如用天线法进行试验)和辐射抗扰度试验,就必须考虑环境和试验场地对试验结果的影响。在这种情况下,普通的屏蔽室在使用上有困难(有信号的谐振问题),就必须用到开阔场和电波暗室了。但开阔场在建造和使用方面都有较大局限性。电波暗室尽管造价昂贵,但性能的优越性使得它获得了越来越多的应用。以下分别对电磁屏蔽室、开阔试验场和电波暗室进行介绍。

(1) 电磁屏蔽室。电磁屏蔽室是进行电磁兼容试验的重要设备之一,其主要作用是隔离电磁场。它是一个由低电阻金属材料制作的封闭室体,利用电磁波在金属体表面产生反射和涡流而起到屏蔽,当与大地连接后,同时能起到静电屏蔽作用。

电磁屏蔽室由屏蔽壳体、屏蔽门、通风波导窗及各类电源滤波器等组成。屏蔽壳体通常采用钢板焊接式,其外观及室内效果图如图 5.8-34 所示。

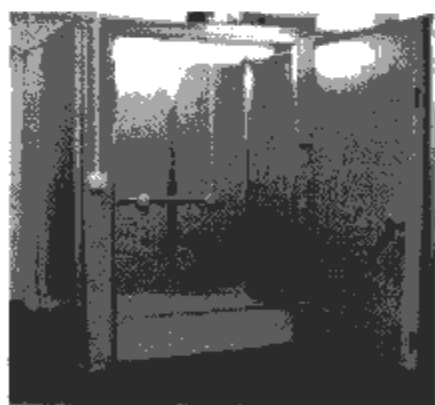


图 5.8-34 电磁屏蔽室的外观及室内效果图

洞;金属网孔径的最大尺寸必须小于波长的十分之一;反射地面的面积大小以满足“场地有效性”要求为准,必须平整。

为了确保受试设备(EUT)骚扰场强的有效性和可重复性,对开阔场的传输特性、面积、环境条件、周围反射体、场地地面及与试验场有关的辅助设施都有一定的限制和规定,详细规定见相关标准中内容。

(3) 电波暗室。电波暗室又叫屏蔽暗室,或者称无反射屏蔽室,根据地面是否电波反射面,分为全电波暗室和半电波暗室,主要包括:

1) 电磁屏蔽室。

2) 射频吸波材料:①单层铁氧体片,工作频率范围30~1000MHz;②锥形含碳海绵吸波材料,由聚氨酯泡沫塑料在碳胶溶液中渗透而成,具有较好的阻燃特性。

3) 附件:主要有信号传输板、转台、天线、监控系统等。

电波暗室的尺寸和射频吸波材料的选用主要由受试设备(EUT)的外形尺寸和测试要求确定,分3m法、10m法等。标准的3m法电磁兼容测试在业内被广泛采用,电磁兼容3m法电波暗室采用了铁氧体 Ferrite 与高效混合吸波材料组合技术,适合于进行标准的辐射发射和抗扰度测试。电波暗室的室内效果图如图 5.8-35 所示。

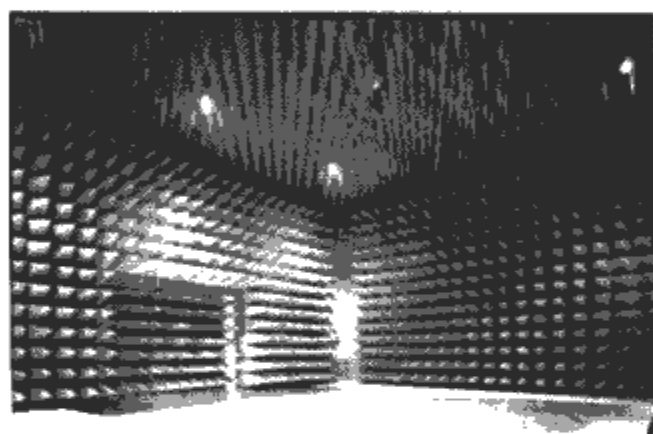


图 5.8-35 电波暗室的室内效果图

9.1 电磁发射试验及设备

电磁发射试验根据环境不同,有两种试验标准:第1种环境为居住、商业和轻工业环境,第2种环境为工业环境。

(1) 居住、商业和轻工业环境下通用发射试验。

1) 居住、商业和轻工业环境。在居住、商业和轻工业环境使用的电气和电子设备,产生的电磁发射有可能干扰无线电接收机等其他设备。通过进行居住、商业和轻工业环境通用发射试验,以保证在该环境下正常工作的设备所产生的骚扰不会超过可以妨碍其他设备按预定方式工作的程度。在该环境所涉及场所下安装的设备,是直接连接到低压公共电网,或是连接到介于设备和低压公共电网之间的专用直流电源。该试验适用于测量0~400GHz频率范围内的骚扰。

凡是直接从公共电网以低电压供电的场所均认为是属于居住、商业和轻工业环境。

2) 试验方法。在居住、商业和轻工业环境下,由于端口不同,设备对外干扰的影响也不同,因此应根据端口对设备的发射限值进行规定。测量方法、测量场所和测量的必要条件等见相关试验标准。

(2) 工业环境下通用发射试验。

1) 工业环境。在工业场所或工业电力设施附近工作的设备不连接到公共低压电网而要连接到由专门的高压或中压

(2) 开阔试验场。正常情况下,无线电骚扰辐射场强测量是在开阔场进行的。开阔场应具有空旷、水平的地形特点,至少在要求的面积范围内,无明显的高于地面的反射体。在受试设备和场强测量天线周围需要一个无障碍区,这个区域应远离那些具有较大电磁场的散射体,且这个区域应足够大。为了获得稳定的电波传输特性,必须有一个固定的、有相当大面积的反射地面,或称接地平板;该地面必须用高电导率的金属材料构成,一般由钢板、镀锌薄钢板、金属丝网等构成,板与板之间用电焊连接,无大的漏缝或孔

变压器供电的电网上,该电网为制造厂或类似工厂供电的设施提供电源。

工业场所的特征是具备下列一个或多个状态:①有工业、科学、医疗(ISM)设备(指 CISPR11 定义的 A 类 ISM 设备);②大的感性负载或容性负载频繁接通或断开;③大电流并伴有强磁场。

这些状态是工业电磁环境的主要来源,并以此来区分其他工业环境。

2) 试验方法。工业环境下,根据端口对设备发射限值进行规定。测量方法、测量场所和测量的必要条件等见相关的基本标准。

9.1.1 电磁发射试验设备

电磁发射试验设备主要包括测量接收机、人工电源网络、电压探头和电流探头及吸收钳、天线等测量辅助设备。

9.1.1.1 测量接收机

测量接收机是用于测量无线电骚扰电压、骚扰电流、骚扰功率或骚扰场强的专用测量设备,由于大多数骚扰信号是脉冲性质的,因此,测量接收机除了有特殊的电气性能和机械性能外,对脉冲的响应有专门要求。

采用准峰值检波器的测量仪器称为准峰值测量接收机,是电磁发射试验的基本测量设备。采用峰值、平均值或均方根值检波器的骚扰测量仪分别称为峰值、平均值及均方根值测量接收机。虽然这些检波器的性能是利用其对规则重复脉冲的响应来规定的,但它们也可用于测量各类非脉冲性质的无线电骚扰信号,如宽带骚扰及某些类型的窄带骚扰。

此外,通常也有用频谱分析仪来测量 EMI 的,由于普通频谱仪没有预选滤波器且灵敏度低,因而测量的数值是不准确的,特别是对脉冲干扰的测量。无预选功能的频谱分析仪对宽带干扰信号的加权校正测量很繁琐,且其输入不能提供测量宽带干扰信号所需的动态范围。为解决此问题,可对频谱分析仪进行改进,使它们满足上述要求。通过增加一些模块,使原来的频谱仪类似 1 台接收机,但通过按一个键即可简单地变回普通频谱分析仪。

频谱分析仪改造的接收机与传统的 EMI 接收机相比明显具有扫频测量速度快、覆盖同样频段的仪器体积小、价格相对便宜等优点,对所关注的频段扫描测量后,可直接给出频谱分布图形。因而,越来越多的实验室选用频谱分析仪式接收机作为 EMI 测量用仪器。

测量接收机是精密的测量仪器,使用时应注意电源电压、频率、温度与湿度、振动及骚扰信号的量级等,必须符合仪器的要求。

(1) 测量接收机的组成。测量接收机电路框图如图 5.8-36 所示,各部分功能如下:

1) 输入衰减器。输入衰减器可将外部进来的过大的信

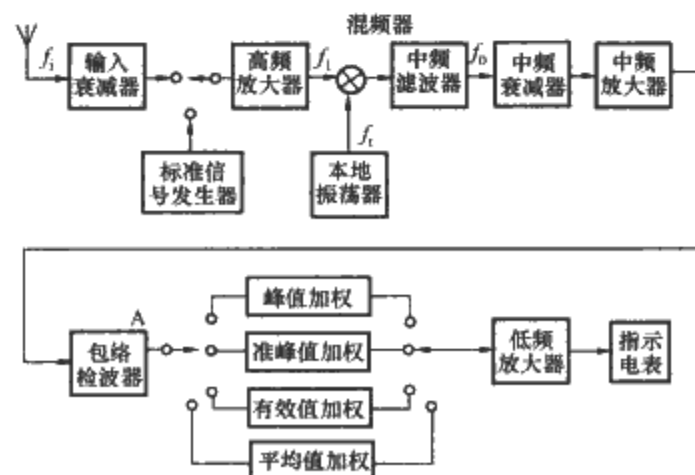


图 5.8-36 测量接收机电路框图

号或干扰电平衰减,调节衰减量大小,保证输入电平在测量接收机可测范围之内,同时也可避免过电压或过电流造成测量接收机的损坏。

2) 校准信号发生器。测量接收机本身提供的内部校准信号发生器,可随时对接收机的增益进行自校,以保证测量值的准确。普通接收机不具有校准信号发生器。

3) 高频放大器。利用选频放大原理,仅选择所需的测量信号进入下级电路,而外来的各种杂散信号(包括镜像频率信号、中频信号、交调谐波信号等)均排除在外。

4) 混频器。混频器将来自高频放大器的高频信号和来自本地振荡器的信号合成产生一个差频信号输入中频放大器,由于差频信号的频率远低于高频信号频率,使中频放大级增益得以提高。

5) 本地振荡器。本地振荡器提供一个频率稳定的高频振荡信号。

6) 中频放大器。由于中频放大器的调谐电路可提供严格的频带宽度,又能获得较高的增益,因此可保证接收机的总选择性和整机灵敏度。

7) 检波器。测量接收机的检波方式与普通接收机有很大差异。测量接收机除可接收正弦波信号外,更常用于接收脉冲干扰信号,因此测量接收机除具有平均值检波功能外,还增加了峰值检波和准峰值检波功能。

8) 输出指示。早期测量接收机采用表头指示电磁干扰电平,并用扬声器播放干扰信号的声响。近几年已广泛采用液晶数字显示代替表头指示,且具备程控接口,使测量数据可存储在计算机中进行处理或打印出来供查阅。

(2) 测量接收机的工作原理。接收机测量信号时,先将仪器调谐于某个测量频率 f_i ,该频率经高频衰减器和高频放大器后进入混频器,与本地振荡器的频率 f_L 混频,产生很多混频信号,经过中频滤波器后仅得到中频 f_o 。中频信号经中频衰减器、中频放大器后由包络检波器进行包络检波,滤去中频,得到低频信号 $A(t)$; $A(t)$ 再进一步进行加权检波,根据需要进行选择检波器,得到 $A(t)$ 的峰值(Peak)、有效值(Rms)、平均值(Ave)或准峰值(QP)。这些值经低频放大后可推动电表指示或在数码管屏幕显示出来。

测量接收机测量的是输出到其端口的信号电压,为测场强或干扰电流需借助一个换能器,在其转换系数的帮助下,将测到的端口电压变换成场强(单位 $\mu\text{V}/\text{m}$ 或 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$)、电流(单位 A 或 $\text{dB}\mu\text{A}$)或功率(单位 W 或 dBm)。换能器依测量对象的不同可以是天线、电流探头、功率吸收钳或电源阻抗稳定网络等。

9.1.1.2 人工电源网络

人工电源网络(也称电源阻抗稳定网络)能在射频范围内向被测设备提供一个稳定的阻抗,并将被测设备与电网上的高频干扰隔离开,然后将干扰电压耦合到测量接收机上。

人工电源网络有两种基本类型:用于耦合不对称电压的 V 形;能分别用于耦合对称电压和不对称电压的 Δ 形。对于每根电源线,人工电源网络都对应有三个端子,连接电源的电源端、连接受试设备的设备端和连接测试设备的测量端。

为了确保电网上的无用信号在所有测试频率上都不影响测量,需要在人工电源网络和电网之间插入附加的射频低通滤波器,插入的低通滤波器应加以屏蔽,且与测量系统的参考地直接相连。同时人工电源网络的阻抗仍应满足相应要求。

9.1.1.3 电压探头和电流探头

电压探头由一个隔直电容器 C 和电阻 R 组成, 用来测量电源线与地之间的电压, 电源线与地之间的总阻抗值为 1500Ω 。电压探头也可测量其他电源线上的电压, 此时可能需要增加探头输入阻抗, 以避免高阻抗电路过载。考虑到安全因素, 在测量接收机的输入端可跨接一个电感, 其值 X_L 大于电阻 R 。

电流探头是一种专门改进的卡式电流传感器, 用以测量线路 (电源线、信号线、负载线) 上的非对称、对称和不对称干扰电流, 它不需要与原导线电接触, 也不用改变原电路, 可以在不打乱被测对象正常工作或正常布置的状态下进行。

电流探头为圆环形卡式结构, 如图 5.8-37 所示, 能方便地卡住被测导线。其核心部分是一个分成两半的环形高磁导率磁心, 磁心上绕有 N 匝导线。当电流探头卡在被测导线上时, 被测导线作为单匝的一次绕组, 二次绕组则包含在电流探头中。

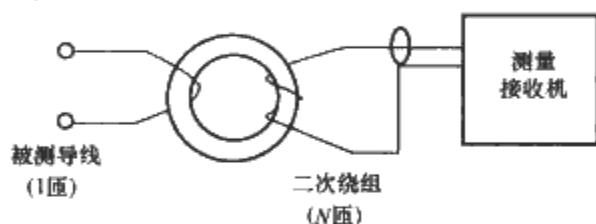


图 5.8-37 电流探头电路结构图

电流探头适用频率范围为 $30\text{Hz} \sim 1000\text{MHz}$, 在通带内具有平坦的影响。在低于通带的频率范围内, 仍可进行精确测量, 只是由于传输阻抗的减少降低了灵敏度。但高于通带的频率, 由于电流探头产生谐振, 测量不精确。在附加屏蔽结构后, 可以测量两线 (相线或中线) 电路中的非对称 (共模) 骚扰电流或对称骚扰 (差模) 电流 (只适用于 $100\text{kHz} \sim 20\text{MHz}$ 频段)。

9.1.1.4 吸收钳

吸收钳只适用于测量某些类型设备的电缆上辐射出来的骚扰功率, 这取决于这些设备的结构和尺寸, 如果受试设备 (不包括引线) 的尺寸接近测量频率的 $1/4$ 波长, 那么就可能发生机壳直接辐射的现象。

带电源线的设备, 其骚扰功率可以用起天线作用的电源线所提供的能量来衡量, 该功率近似等于吸收装置环绕引线放置时能吸收到的最大功率, 吸收装置称为吸收钳或铁氧体钳。除了设备的电源线外, 设备的其他外部引线也可能与电源线以同样的方式辐射能量, 吸收钳也能对这些引线进行测量。

在 $300 \sim 1000\text{MHz}$ 频段, 设备引线的辐射可以用适宜的吸收钳来测量, 但需注意, 在该频段大部分的辐射是直接由设备发射出去的。吸收钳的组成示意图如图 5.8-38 所示。

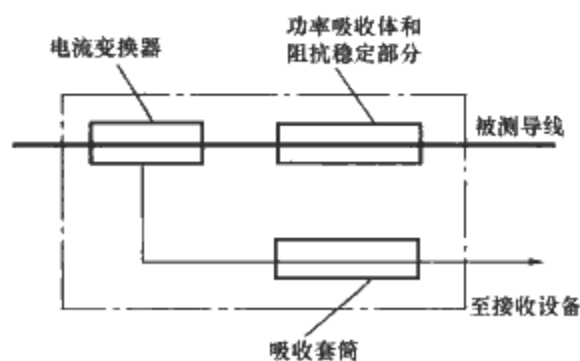


图 5.8-38 吸收钳的组成示意图

吸收钳的结构由以下组成:

(1) 宽带射频电流变换器。

(2) 宽带射频功率吸收体和受试设备引线的阻抗稳定器。

(3) 吸收套筒, 即铁氧体环的附件, 用以减少来自电流变换器到测量接收机的同轴电缆表面上的射频电流。

9.1.1.5 骚扰分析仪

骚扰分析仪用于喀喇声测量, 对诸如开关操作所引起的骚扰的幅度、发生率和持续时间进行自动评定。它与带准峰值检波的测量接收机一起使用。

9.1.1.6 天线

天线是把高频电磁能量通过各种形状的金属导体向空间辐射出去的装置。同样, 天线亦可把空间的电磁能量转化为高频能量收集起来。天线应为平面极化, 有方向性。天线与测量接收机连接后, 不应影响测量接收机的总特性。

天线分为磁场天线和电场天线两大类:

(1) 磁场天线。磁场天线用于接收被测设备工作时泄漏的磁场、空间电磁环境的磁场及测量屏蔽室的磁场屏蔽效能, 测量频段为 $25\text{Hz} \sim 30\text{MHz}$ 。根据用途不同, 天线类型分为有源天线和无源天线。通常有源天线因具有放大信号的作用, 非常适合测量空间的弱小磁场, 此类天线有带屏蔽的环天线。近距离测量设备工作时泄漏的磁场通常采用无源环天线, 与有源环天线相比, 无源环天线的尺寸较小。测量时, 环天线的输出端与测量接收机或频谱仪的输入端相连, 测量的电压值加上环天线的天线系数, 即得所测磁场。环天线的天线系数是预先校准出来的, 通过它才能将测量设备的端口电压转换成所测磁场。

(2) 电场天线。电场天线用于接收被测设备工作时泄漏的电场、环境电磁场及测量屏蔽室 (体) 的电场屏蔽效能, 测量频段为 $10\text{kHz} \sim 40\text{GHz}$ 。根据用途不同, 天线分为有源天线和无源天线两类。电磁兼容测量中通常使用宽带天线, 配合测量接收机进行扫频测量。有源天线是为测量小信号而设计的, 其内部放大器将接收到的微弱信号放大至接收机可以测量的电平, 主要用在低频段、测量天线的尺寸远小于被测信号的波长且接收效率很低的情况。

下面介绍几种常用的电场天线。

1) 杆天线。天线杆长 1m , 用于测量 $10\text{kHz} \sim 30\text{MHz}$ 频段的电磁场, 形状为垂直的单极子天线, 由对称振子中间插入地网演变而来, 所以测试时一定要按天线的使用要求安装接地网 (板)。杆天线分为无源杆天线和有源杆天线, 区别在于测量的灵敏度不同。无源杆天线通过调谐回路分段实现 50Ω 输出阻抗; 而有源杆天线则通过前置放大器实现耦合和匹配, 同时提高了天线的探测灵敏度。对无源杆天线, $10\text{kHz} \sim 30\text{MHz}$ 需分多个频段分别调谐, 测量场强一般为 1V/m 以上; 而有源杆天线因配有前置放大器, 灵敏度大大提高, 可达 $10\mu\text{V/m}$, 但测量的场强上限最大为 1V/m 左右, 否则会出现过载现象。有源杆天线还具有宽频段的特点, 无需转换波段, 其前置放大器增益在整个测量频段内基本保持不变, 在手动测量中可免去查天线系数的麻烦。

2) 双锥天线。双锥天线的形状与偶极子天线十分接近, 它的两个振子分别为六根金属杆组成的圆锥形, 天线通过传输线平衡变换器将 120Ω 的阻抗变为 50Ω 。双锥天线的方向图与偶极子天线类似, 测量的频段比偶极子天线宽, 且无需调谐, 适合与接收机配合, 组成自动测试系统进行扫频测量。测量频段为 $30 \sim 300\text{MHz}$ 。

双锥天线不仅用于电磁场辐射发射测量, 也用于辐射敏感度或抗扰度的测量。前者测量的是小功率电场, 可用功率

容量小的天线；后者发射和接收的功率均较大，比如20V/m，因此应选用能承受几百瓦功率的双锥天线。

3) 半波振子天线。半波振子天线是最简单的天线，30MHz以上随着工作波长的缩短，使用谐振式对称振子天线进行场强测量成为可能，早期国产干扰测量仪配备的就是这种天线。

半波振子天线主要由一对天线振子、平衡/不平衡变换器及输出端口组成。天线振子根据所测信号频率对应的波长，将天线振子的长度调到半波长，同时调节平衡/不平衡阻抗变换器（75~50Ω），使天线的输出端具有小的电压驻波比。利用半波振子天线测量干扰场强的不足之处在于它的测量频段窄，如28~500MHz，需4副天线才能覆盖；且测量时，每个频点均需调谐，在低频时，半波振子天线尺寸太大，架设不便。因此，半波振子天线多用于校准试验和有专门要求的辐射发射测试。

4) 对数周期天线。对数周期天线结构上下有两组振子，从长到短交错排列，最长的振子与最低的使用频率相对应，最短的振子与最高的使用频率相对应。对数周期天线有很强的方向性，其最大接收/辐射方向在锥底到锥顶的轴线方向。对数周期天线为线极化天线，测量中可根据需要调节极化方向，以接收最大的发射值。它还具有高增益、低驻波比和宽频带等特点，适用于电磁干扰和电磁敏感度测量，测量频段为80~1000MHz。

5) 双脊喇叭天线。双脊喇叭天线的上下两块喇叭板为铝板，铝板中间位置是扩展频段用的弧形凸状条，两侧为环氧玻璃纤维的覆铜板，并刻蚀成细条状，连接上下铝板。双脊喇叭天线为线极化天线，测量时通过调整托架改变极化方向。因其测量频段较宽，可用于0.5~18GHz辐射发射和辐射敏感度测试。

6) 喇叭天线。喇叭天线中最常见的是角锥喇叭天线，它的使用频段通常由馈电口的波导尺寸决定，比双脊喇叭天线窄很多，但方向性、驻波比及增益等均优于双脊喇叭天线，在1GHz以上高场强（如200V/m）的辐射敏感度测量中，为充分利用放大器资源，选用增益高的喇叭天线做发射天线，可较容易达到所需的高场强值。

9.1.2 电磁发射测量系统及测量软件

EMI自动测量系统主要由测量接收机和各种测量天线、传感器及电源阻抗稳定网络组成，用于测量电子、电气设备工作时泄漏出来的电磁干扰信号，测量频段为20Hz~40GHz。干扰信号的传播途径分为两种：一种是传导干扰，通过电源线或互连线传播；另一种是辐射干扰，通过空间辐射传播。测量接收机借助不同的传感器测量传导和辐射干扰，如利用测量天线接收来自空间的干扰信号，利用电流钳探测电源线上的干扰电流。对时域干扰，如开关闭合产生的瞬态尖峰干扰，则需通过示波器采样来捕捉、测量，以国标EMI自动测量系统的组成为例，其组成框图如图5.8-39所示。

由于EMI测量大部分为扫频测量，数据量较大，数据处理复杂，因此多利用计算机组成自动测量系统，可大大简化测量过程、节约大量数据处理的时间。特别是按测量标准编制的测量软件，包含了测量设备和附件的名称、型号，设备的配置和连接，测试参数的设定，测试项目的要求与极限值，信号的识别以及天线系数、电缆损耗、带宽修正系数和测试结果数据库，并能给出数据和曲线两种结果输出形式。测试人员只要通过计算机设置测试参数，然后运行测量程序，即可实现数据的自动采集、处理，并输出测量结果，最

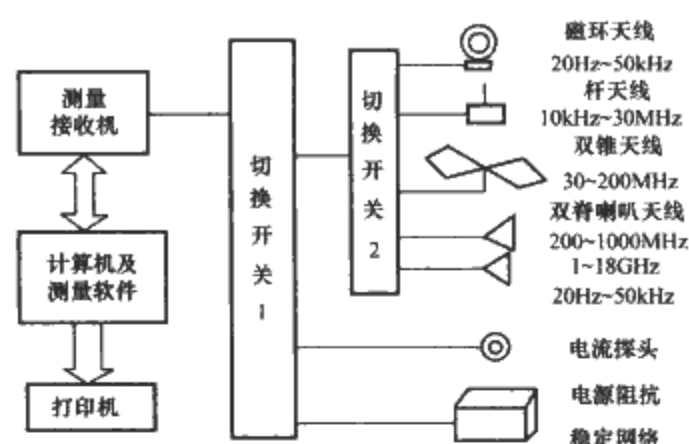


图 5.8-39 电磁干扰自动测试系统组成框图

后形成测试报告。

国标测量系统还包括转台和可升降天线架，通过计算机控制转台旋转方向，寻找被测设备电场辐射最大的方位，通过升降天线，测出辐射场强的最大值。

EMI测试涉及的仪器虽然不多，但处理数据的工作量较大，因为无论是干扰场强还是干扰电压、电流的测量，都不是直接可以从仪器上读出数据来的，需要计入传感器、天线的转换系数，还要与标准规定的极限值进行比较，以判定干扰信号是否超标。当干扰信号数量很多时，手动测量显得既费时又费力。这时，测量软件的作用就充分体现出来。在常规的EMI测试中，测量软件有以下四大功能：

(1) 参数设置。包括测试标准的选择、测试配置提示、测量参数的设置，如测量频段、测量带宽、检波器、衰减器、扫频步进、每个测量点的驻留时间等。

(2) 控制仪器进行信号测量，以一定的步长和速率对信号进行扫频测量、判别和读出数据。

(3) 数据处理能力。测量软件自动将测量的信号电压转换成干扰的量值，即自动补偿因传感器的使用而引入的、随频率变化的校准系数，并可以用线性或对数频率坐标显示出干扰信号的频谱分布，同时自动与相应极限值进行比较，判别信号是否超标，并在图中表示出信号频谱与极限值的关系。软件还可以提供信号分析的基本能力，如测量特殊频点信号的幅度和频率，给出与极限的差值，在小范围内实时复测等。

(4) 数据的存储和输出能力。测量软件能够将每次的测量数据列表存放，需要时提取，特别是传感器系数和极限值的数据存储，便于数据处理时调用。

9.2 电磁抗扰度试验及设备

电磁抗扰度试验也有两种，第1种适应居住、商业和轻工业环境，第2种适应工业环境。

(1) 居住、商业和轻工业环境下抗扰度试验。

1) 抗扰度试验限值。针对不同的端口有不同的试验项目和抗扰度限值。

2) 性能准则。由于设备品种繁多，因此难以规定精确的准则来评价抗扰度试验结果。如果由于应用该标准规定的试验而使设备变得不安全或有危险，则应认为设备的试验是失败的。

在EMC抗扰度试验期间，或因为试验结果的需要，制造商应提供设备功能的说明和性能准则的定义，并根据如下准则记录在试验报告中。

a) 性能准则A。在试验期间和试验之后，设备应按预定方式连续工作，当设备按预定方式使用时，其性能应没有降低或者功能没有丧失，即不允许低于制造商规定的性能水

平。性能水平可以用允许丧失的性能来代替。如果制造商没有规定最低性能水平或允许丧失的性能，则二者均可从产品说明书或产品文件中导出。如果按预定方式使用设备，那么用户也可以合理地期望设备应达到的性能水平。

b) 性能准则 B。在试验之后，设备应按预定方式连续工作，当设备按预定方式使用时，其性能应没有降低或者功能没有丧失，即不允许低于制造商规定的性能水平。性能水平可以用允许丧失的性能来代替。然而，在试验期间，允许性能降低，但不允许实际工作状态或存储的数据改变。如果制造商没有规定最低性能水平或允许丧失的性能，则二者均可从产品说明书或产品文件中导出。如果按预定方式使用设备，那么用户也可以合理地期望设备应达到的性能水平。

c) 性能准则 C。允许暂时丧失功能，只要这种丧失的功能可自行恢复或可以通过操作控制器来恢复。

3) 试验方法。试验方法见相关试验标准。

(2) 工业环境抗扰度试验。

1) 抗扰度试验限值。针对不同的端口有不同的试验项目和抗扰度限值，见相关试验标准。

2) 性能准则。评价工业环境下抗扰度试验的准则与居住、商业和轻工业环境抗扰度试验的准则相同。

3) 试验方法。试验方法见相关试验标准。

9.2.1 静电放电抗扰度试验及设备

静电放电抗扰度试验是模拟操作人员或物体在接触设备时的放电及人或物体对邻近物体的放电，以考察被试设备抵抗静电放电干扰的能力。这里，前者是通过导体直接耦合，是直接放电影响；而后者则是通过空间辐射耦合，是间接放电影响。在试验中，直接放电就是用放电电极直接对被试设备实施放电，而间接放电则是对被试设备附近的耦合板实施放电。

静电放电抗扰度试验的目的在于建立公共的和可重现的基准，以评价电力和电子设备遭受静电放电时的性能。此外，它还包括从人体到靠近要害设备物体之间可能发生的静电放电。

9.2.1.1 试验等级

在静电放电试验中，接触放电是首选的试验方法，在相同的放电电压下，接触放电的严酷度要大大高于空气放电的严酷度。但在一些情况下，如安装的螺钉的金属部分可见却不可及，键盘的金属导电部分在绝缘层的覆盖下时，就不得不使用空气放电的方法。具体的等级要由相关部门根据产品的使用情况加以选择。在被试设备具有绝缘表面的情况下，可使用电压高达 15kV 的空气放电方法。静电放电抗扰度试验的等级见表 5.8-16。

表 5.8-16 静电放电抗扰度试验等级

接触放电		空气放电	
等级	试验电压 (kV)	等级	试验电压 (kV)
1	2	1	2
2	4	2	4
3	6	3	8
4	8	4	15
X	特殊	X	特定

由于接触放电和空气放电是不同的放电形式，因此，相同的接触放电等级与空气放电等级并不意味着它们具有相同的严酷等级。表 5.8-16 中的 X 等级是由相关部门根据具体情况自定义的等级，可以采用试验所需要验证的任何电压。

9.2.1.2 试验设备

(1) 静电放电发生器。静电放电发生器的主要部分包括：①充电电阻 R_c ；②储能电容器 C_s ；③分布电容 C_d ；④电压指示器；⑤放电开关；⑥可更换的放电电极；⑦放电回路电缆，一般长为 2m，它的结构应符合发生器的波形要求，并且有足够的绝缘强度来防止静电放电时放电电流不通过端口而流向人员或导电表面。对于大型较高的被试品，若 2m 长的放电回路不够长，可用不超过 3m 的电缆，且必须检验，并使放电电流波形符合技术规范。

静电放电发生器简图如图 5.8-40 所示，其输出的电流波形如图 5.8-41 所示，静电放电波形参数见表 5.8-17。实践证明，对于再现人体放电，用 150pF 的电容器来模拟人体电容和用 330Ω 的放电电阻来模拟人体电阻，其严酷度是足够的。

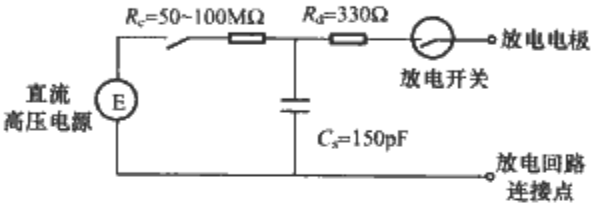


图 5.8-40 静电放电发生器简图

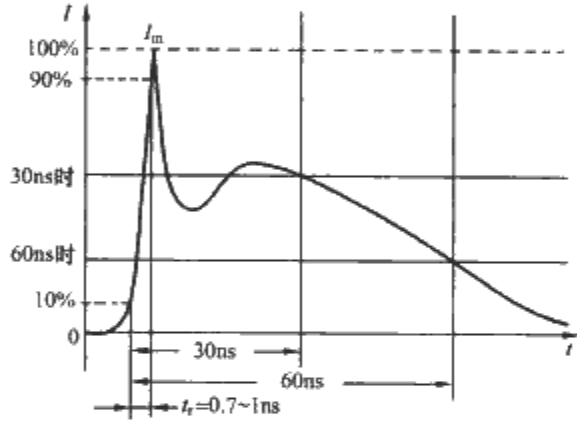


图 5.8-41 静电放电发生器输出的电流波形

表 5.8-17 静电放电波形参数

等级	指示电压 (kV)	放电的第一个峰值电流 ±10% (A)	放电开关操作时的上升时间 t_r (ns)	在 30ns 时的电流 (±30%) (A)	在 60ns 时的电流 (±30%) (A)
1	2	7.5	0.7~1	4	2
2	4	15	0.7~1	8	4
3	6	22.5	0.7~1	12	6
4	8	30	0.7~1	16	8

(2) 试验室试验配置。静电放电试验分为在试验室进行的型式试验和现场进行的设备安装后试验。优先采用在试验室进行试验，其基本要求如下：

1) 地面放置一块最小 1m×1m、厚度≥0.25mm 的铜板或铝板，如果用其他金属材料，厚度≥0.65mm，接地平面的每边至少伸出被试品 0.5m 并连接安全接地系统。

2) 被试品与试验室墙壁和其他金属结构之间的距离至少为 1m。

3) 被试品按制造厂安装说明书布置，被试品接地按设备技术条件接地，不允许附加接地。

4) 电源与信号电缆的布置要反映实际安装条件，与接地参考平面连接的接地线和所有节点均为低阻抗。

5) 间接放电的耦合板与接地参考平面应采用相同金属材料 and 厚度，每块耦合板两端各设置 470kΩ 电阻的电缆与接地参考平面相连。

(3) 安装后的试验布置。安装后的试验即为现场试验，这种试验是供选择而非强制性的鉴定试验，只是在制造商和用户双方一致同意下进行。

接地参考平面的材料和厚度与试验室布置的接地参考平面相同，长约 2m，宽 0.3m，铺设在地面上，并保持与被试品 0.1m 的间距。接地参考平面与安全系统相连接。

9.2.1.3 试验方法及结果判定

(1) 试验环境条件。

1) 气候环境条件。环境温度为 15~35℃，相对湿度为 30%~60%，大气压力为 86~106kPa。

2) 电磁环境条件。试验室的电磁环境不应影响试验结果。

(2) 试验的实施。试验应按计划进行，对被试品采用直接和间接放电方式进行。包括被试品典型工作条件；被试品放置在桌面上或地面上进行试验；确定施加放电点；在每个点，是采取空气放电还是接触放电；所采用的试验等级以及在每个放电点上的放电次数。为了制订试验计划，需要仔细观察被试品、技术条件、使用说明书。

1) 直接放电。这种放电仅适用于使用人员可能接触的点和表面以及允许用户维修的点和面，试验应从最小值升至选定的试验值，最后试验值不应超过产品规范值。试验应以单次方式，在预选点上施加至少 10 次单次放电并以最敏感的极性施加，两次单次放电间隔至少 1s。先以 20 次/s 的速率试探试验点和敏感极性。一般可考虑的试验点为操作人员可能触及的金属点、开关、按键、按钮以及其他操作人员易接近的区域，如指示器、发光二极管 (LED)、缝隙、栅格、连接罩、更换电池的电池夹、IC 卡的插缝等。静电放电发生器的放电电极应保持与被试品表面垂直。空气放电时，放电电极应尽可能接近并触及被试品。每次放电后，应将放电电极从被试品移开，然后重新触发静电放电发生器，进行新一次单次放电。

2) 间接放电。使用静电放电发生器对耦合板进行接触放电以模拟被试品受附近物体放电的影响。

3) 台式设备试验布置。接地参考平面上放一个木桌子，桌子高 0.8m，桌面上放置面积 1.6m×1.6m 的水平耦合板，并用一个厚为 0.5mm 的绝缘衬垫将被试品和电缆与耦合板隔开。

4) 落地式设备试验室布置。受试设备与电源应采用厚为 0.1m 的绝缘体与接地参考平面隔开。所有受试设备的安装脚保持原位。

5) 水平耦合试验。将放电电极放在离被试品前后左右 0.1m 处，放电枪垂直于水平耦合板的表面，放电电极对耦合板进行接触放电。进行至少 10 次的单次放电，而放电位置应在受试设备四周最敏感的点，并用最敏感的极性。

6) 垂直耦合试验。将尺寸为 0.5m×0.5m 的耦合板平行与受试设备前后左右保持 0.1m 的地方，放电电极触及耦合板一个垂直边的中心以最敏感的极性进行至少 10 次单次接触放电。

(3) 试验结果判定。按标准试验评定等级如下：

1) 在技术范围内性能正常。

2) 功能或性能暂时降低或丧失，但可自行恢复。

3) 功能或性能暂时降低或丧失，要求操作人员干预或系统复位才能恢复正常。

4) 由于设备 (元件) 或软件的损坏或数据丧失，而造成不可自行恢复的功能降低或丧失。

评定时，第 1) 项判为通过，第 4) 项判为不通过，而第 2)、3) 两项需用户与制造商协商来进行判定。

9.2.2 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验及设备

由于在同一供电回路中其他用电设备在工作过程中 (如开关、继电器等在使用时) 产生瞬态脉冲骚扰，这种骚扰以脉冲群形式出现，如果电感性负载多次重复切换，则脉冲群会以相应的时间间隔多次重复出现，其特点是脉冲上升时间短、重复率高、能量低和频谱分布较宽等。出现对其他用电设备产生干扰的情况，可能导致这些设备的性能下降或失灵的现象。为评定产品对这类电快速瞬变脉冲群抗扰度的水平，应进行电快速瞬变脉冲群抗扰度试验。

电快速瞬变脉冲群抗扰度试验是一种将一系列电快速瞬变脉冲群耦合到电气和电子设备的电源端口、信号和控制端口的试验。其目的在于建立公共和可重现的基准，用来评估电气和电子设备的供电电源端口、信号和控制端口在受到重复性电快速瞬变脉冲群干扰时的性能。

9.2.2.1 试验等级

对设备的供电电源、保护接地 (PE)、信号和控制端口进行电快速瞬变脉冲群抗扰度试验时，优先采用的试验等级见表 5.8-18。

表 5.8-18 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验等级

等级	开路输出试验电压 (±10%) 和 脉冲的重复率 (±20%)				设备最实际的 安装环境条件
	在供电电源和 保护接地 (PE) 端口		在信号和 控制端口		
	电压峰值 (kV)	重复率 (kHz)	电压峰值 (kV)	重复率 (kHz)	
1	0.5	5	0.25	5	受良好保护的环境，如 计算机房
2	1	5	0.5	5	受保护的环境，如工厂 和发电厂的控制室或终 端室
3	2	5	1	5	典型的工业环境，如工 业过程设备的安装场所
4	4	2.5	2	5	严酷的工业环境，如没 有采取特殊安装措施的 工业过程设备的户外区域
X	特定	特定	特定	特定	需要加以分析的环境。 在专用设备技术规范中必 须对这个级别加以规定

9.2.2.2 试验设备

(1) 电快速瞬变脉冲群发生器特性参数 (接 50Ω 负载时) 如下：

1) 极性为正负极性。

2) 单个脉冲的上升时间为 $5 \times (1 \pm 30\%) \text{ ns}$ 。

3) 脉冲持续时间 (半峰值) 为 $50 \times (1 \pm 30\%) \text{ ns}$ 。

4) 与供电电源同步。

5) 脉冲群持续时间为 $15 \times (1 \pm 20\%) \text{ ms}$ (如图 5.8-42 所示)。

6) 脉冲群周期为 $300 \times (1 \pm 20\%) \text{ ms}$ (如图 5.8-42 所示)。

7) 脉冲重复率：开路输出电压为 0.25kV, 0.5kV, 1kV, 2kV 时，为 $5 \times (1 \pm 20\%) \text{ kHz}$ ；开路输出电压为 4kV 时，为 $2.5 \times (1 \pm 20\%) \text{ kHz}$ 。

8) 开路输出电压范围为 $0.25 \times (1 - 10\%) \sim 4 \times$

(1+10%)kV。

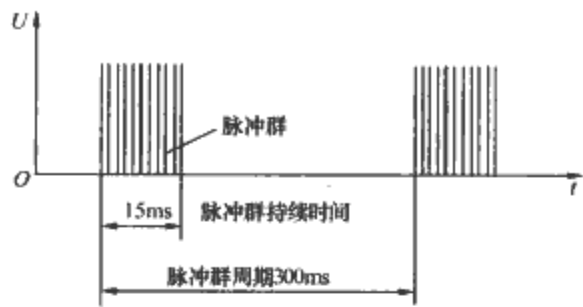


图 5.8-42 电快速瞬变脉冲群

(2) 耦合装置。GB/T 17626.4《电磁兼容试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验》提供两种耦合装置：耦合/去耦合网络和容性耦合夹。耦合/去耦合网络主要用于电源端口试验，它一般装于群脉冲发生器内；容性耦合夹主要用于 I/O 端口和通信端口试验。

(3) 试验配置。电快速瞬变脉冲群试验有两种，即在实验室进行的型式试验和在设备安装条件下的现场试验。必要的设备包括接地参考平台、耦合装置（耦合网络和耦合夹）、去耦网络、试验发生器等。

- (4) 在实验室进行型式试验的标准环境条件。
- 1) 接地平面最小尺寸为 1m×1m，其各边应比被试品大至少 0.1m，接地参考平面同保护地相连。
 - 2) 接地参考平面为厚度不小于 0.25mm 的铜板或铝板，如果用其他金属材料，厚度不小于 0.65mm。
 - 3) 落地式设备与接地参考平面的绝缘支座的厚度为 0.1m，台式设备放在接地参考平面上方 0.8m 处，除此以外，两种设备的试验配置相同。
 - 4) 被试品按正常要求放置和连接。除参考平面外，被试品与其他任何导电结构之间的最小距离应大于 0.5m。
 - 5) 使用耦合夹耦合时，除了接地参考平面之外，耦合板与其他所有导电件之间的最小距离为 0.5m。
 - 6) 被试品严格按照产品技术要求规范接地，不多增加接地措施。
 - 7) 用耦合装置来施加试验电压。试验电压应耦合到被试品和去耦网络之间的线路上或与试验有关的两个设备之间的线路上。

8) 耦合装置和被试品之间的信号线和电源线的长度应不大于 1m。如果制造商提供的与被试品不可拆卸的电源电缆长度超过 1m，那么超出的部分用 0.1m 与接地平面隔开，并以 0.4m 的直线盘绕起来。被试品与耦合装置之间的距离应不大于 1m。对于设备的供电电源端口，一般采用耦合/去耦网络来施加试验电压。对于接地的机柜，机柜上测试点应为保护接地导体的终端，试验电压直接耦合到交/直流电源端口的试验配置如图 5.8-43 所示。

如果线路中的电源超过耦合/去耦网络规定的电流容量，这时采用安装后的试验方法，可通过一个 33nF 的耦合电容，将试验电压施加到设备电源端口上。对于 I/O 端口和通

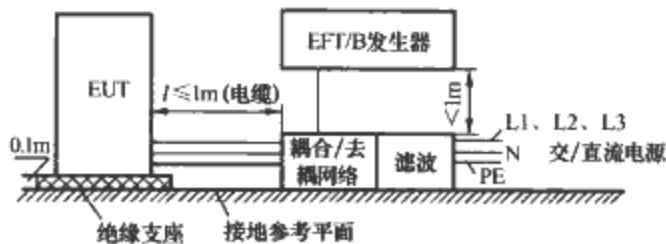


图 5.8-43 试验电压直接耦合到交/直流电源端口的试验配置

信端口，可通过容性耦合夹来施加试验电压。

9.2.2.3 试验方法及结果判定

- (1) 实验室环境条件的检验。
- (2) 设备正常运行的初步检验。
- (3) 按照试验计划进行试验。试验计划应规定以下内容：将要进行的试验类型、试验等级、试验电压的极性、发生器内部或外部驱动、试验持续时间（不少于 1 次/min）、施加试验电压的次数、被试品端口、被试品的典型工作条件、试验电压施加的顺序、辅助设备等。
- (4) 试验结果的判定方法参照静电抗扰度试验。

9.2.3 浪涌抗扰度试验及设备

浪涌抗扰度试验主要分为浪涌电压抗扰度试验和浪涌电流抗扰度试验。浪涌抗扰度试验是模拟雷击带来的严重干扰。在工业过程测量和控制装置的浪涌抗扰度试验是模拟设备在不同环境和安装条件下可能受到的雷击或开关切换过程中所产生的浪涌电压与电流。这为评定设备的电源线、输入/输出线以及通信线的抗扰度提供依据。

雷击瞬变是模拟间接雷击（设备通常不会经受直接雷击），如：①雷电击中外部线路，有大量的电流流入外部线路或接地电阻，因而产生干扰电压；②间接雷击（如云层间或云层内的雷击）在外部线路或内部线路上感应电压或电流；③雷电击中线路邻近的物体，在其周围建立电磁场，使外部线路感应出电压；④雷电击中附近地面，地电流通过公共的接地系统时引起干扰。

开关切换瞬变主要模拟的是：①主电源系统切换（如电容器组切换）时的干扰；②同一电网，在靠近设备附近有一些较小开关动作时形成的干扰；③切换伴有谐振线路的晶闸管设备；④各种系统的故障，如接地短路。

9.2.3.1 试验等级

(1) 为了评定被试设备的抗干扰能力，制定了浪涌抗扰度试验的等级，见表 5.8-19。

表 5.8-19 浪涌抗扰度试验等级			
等级	开路试验电压 (±10%) (kV)	等级	开路试验电压 (±10%) (kV)
1	0.5	4	4.0
2	1.0	X	特定
3	2.0		

注 X 是一个未定等级，提供给厂家或相关部门来自行制定。

应该注意，这里所说的试验等级与设备使用时的安装条件有关。所以应根据产品的使用情况来确定试验等级，可以参照表 5.8-20 选择。

表 5.8-20 由安装条件决定的试验等级

安装等级	电源		不对称长距离线路		对称长线路		短距离线路、数据线①	
	耦合模式		耦合模式		耦合模式		耦合模式	
	线—线 (kV)	线—地 (kV)	线—线 (kV)	线—地 (kV)	线—线 (kV)	线—地 (kV)	线—线 (kV)	线—地 (kV)
0	不测	不测	不测	不测	不测	不测	不测	不测
1	不测	0.5	不测	0.5	不测	0.5	不测	不测
2	0.5	1.0	0.5	1.0	不测	1.0	不测	0.5
3	1.0	2.0	1.0	2.0③	不测	2.0③	不测	不测
4	2.0	4.0②	2.0	2.0③	不测	2.0③	不测	不测
5	②	②	2.0	4.0③	不测	4.0③	不测	不测
X	特定	特定	特定	特定	特定	特定	特定	特定

- ①对于限定的长度，特殊的构造和外形，10~30m 仅有 2 级可实施试验。小于 10m 可不进行。
- ②取决于当地供电系统的等级。
- ③通常是带一次保护来测量。

(2) 可以参照以下规定来划分试验安装等级:

1) 0级: 保护良好的电气环境, 通常在一间特制的房屋内。所有进线电缆都有一过电压和二次过电压保护。电子设备的各部分都有设计良好的接地系统, 它不会受电力设施和雷击的影响。电子设备有特制电源。这时浪涌电压不超过 25V。

2) 1级: 部分保护的电气环境。所有进线电缆都有过电压保护(一次保护)。设备各部分由地线网络相连, 且此地线网络基本上不受电力设施和雷击的影响。电子设备有它自己的供电电源。该房屋内开关操作可能会产生干扰, 但浪涌电压不会超过 500V。

3) 2级: 电缆线被很好地分离开来, 且走线很短的电气环境。这里, 设备经过各自的接地线与电力设备接地线相连, 这些电力设备通常会因为自身或遭雷击的原因而产生干扰。接到电子设备的电源与其他线路分离, 通常是由一台特殊的变压器供电。设备中的非保护线路数量受到限值, 且被良好地分离出来。在这种环境下, 浪涌电压不会超过 1kV。

4) 3级: 电力电缆与信号电缆并行布线的电气环境。设备的接地与电力设备的公共接地系统相连, 而这个电力设备通常会因为自身或雷击的原因而产生干扰。由于电力设备因接地故障、开关动作和雷击等原因产生电流, 可能在接地系统中造成幅值相当高的干扰电压。受到保护的电子设备和不太敏感的用电设备被接至同一个供电电路。内部电缆可能是户外电缆的一部分, 但是与接地网络紧靠在一起。在这个设备中包含一些未加抑制的电感性负载和通常未加分离的不同用途电缆线。此时, 浪涌电压可能不超过 2kV。

5) 4级: 内部接线与户外电缆一起沿着电力电缆布线, 而且这些电缆被作为电子及一般电气线路的接线使用的电气环境。设备被接到电力设备的公共接地系统, 此电力设备通常会因为自身或雷击的原因而产生干扰。电力设备由于接地故障、开关操作和雷击等原因所产生的电流达到 kA 级, 在接地系统中形成了幅值相当高的干扰电压。电子设备与一般电气设备采用同一个电源网络。内部电缆与户外电缆同样布线, 即使是连接高压设备也是如此。这是在人口稠密地区中将电子设备与通信网络接在一起的电气环境的一个特例。在电子设备的外部不存在对称结构的接地网络, 接地系统仅仅由管道和电缆线等组成。在这种电气环境中, 浪涌电压不会超过 4kV。

6) 5级: 在人口稠密地区中, 将电子设备与通信电缆及架空电力电缆连接的电气环境。所有的电缆和线路都有过电压保护(一次保护)。电子设备外部没有广布的接地系统(暴露的工厂)。由于接地故障(电流达到 10kA 级)和雷击(电流达到 100kA 级)而引发的干扰电压可能极高。

7) X级: 在产品说明书中给出特定的条件。

上述 7 级中, 1~4 级波形参数为 $1.2/50\mu\text{s}$ ($8/20\mu\text{s}$), 5 级波形参数为 $1.2/50\mu\text{s}$ ($8/20\mu\text{s}$) 时用于电源线入口及短距离信号线路测试, 波形参数为 $10/700\mu\text{s}$ 时用于长距离信号线路的测试。

对于连接至公共供电网络的接口的抗扰度等级试验, 线—线耦合为 0.5kV, 线—地耦合为 1kV。

9.2.3.2 试验设备

(1) 雷击浪涌发生器。标准描述了两种不同波形发生器, 一种是综合波形发生器 (Combination wave generator); 另一种是符合 CCITT (Consultative Committee, International Telegraph and Telephone, under the Union Nations) 的试验发生器, 该发生器采用悬浮输出方式。浪涌(冲击)

抗扰度试验开路电压波形如图 5.8-44 所示。

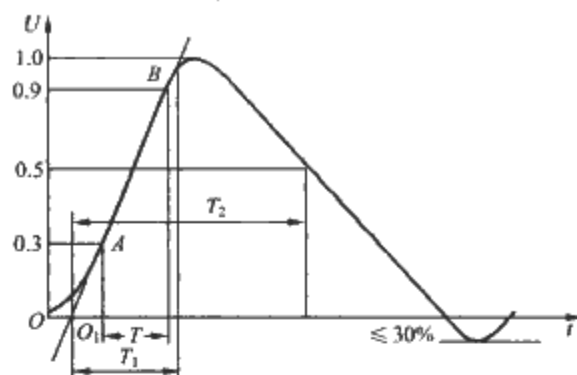


图 5.8-44 浪涌(冲击)抗扰度试验开路电压波形

(2) 耦合/去耦网络。耦合/去耦网络用于雷击浪涌发生器向被试设备传递干扰波通路, 而去耦网络是测试时阻止浪涌干扰窜入同一电网的其他用电设备。

1) 用于 AC/DC 电源电路的耦合和去耦网络(仅用于综合波发生器), 耦合网络的合格与否主要是看其输出端子的波形是否符合有关要求。

2) 用于内部接线的耦合和去耦网络, 对非平衡的、未加屏蔽的 I/O 线路来说, 电容耦合是最好的; 对非屏蔽的平衡线路(通信线路)经由气体放电管的耦合为最好。

9.2.3.3 试验方法及结果判定

试验的环境条件: 环境温度为 $15\sim 35^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 $10\%\sim 75\%$, 大气压为 $86\sim 106\text{kPa}$; 电磁环境应不影响试验结果。

试验程序如下:

(1) 根据产品的实际使用和安装条件, 以及试验打算达到的目的来确定试验的配置(包括改变波形发生器的信号源内阻的附加电阻)。

(2) 根据产品的使用情况来确定试验等级。

(3) 根据试验要求来确定在试验中是用内触发还是外触发方式来激发生波形的干扰输出。

(4) 确定在被试设备上需要进行试验的部件(包括电源、输入和输出等)。

(5) 在每个选定的部件上, 正负极性的干扰至少要各加 5 次, 每次浪涌的最大重复率为 1 次/min(因为大多数系统采用的保护装置在两次浪涌之间有一个恢复期, 所以设备在做浪涌试验时存在一个最大重复率)。

(6) 如果试验是由交流电源供电的, 还要考虑干扰波是不是需要与电源的若干相位点同步。如果无特殊规定, 则要求干扰波在电源波形的过零点和正负峰值点上同步。

(7) 试验中必须考虑被试设备在电流—电压转换时的特性的非线性, 因此试验电压应该是逐步增加到产品标准所规定的电平值。

(8) 浪涌要加在线—线或线—地之间, 如果要进行的是线—地试验, 且无特殊规定, 则试验电压要逐次加在每一根线与地之间。但要注意的是, 有时综合波形发生器要同时测试两根或多根线对地的情形, 这时脉冲的持续期允许减小些。

(9) 对于测试二次保护的试验, 发生器的输出电压必须要提高到最坏的情况, 即使是一次保护出现击穿。

(10) 试验一定要根据产品的要求来进行, 不能使试验电压超过规定值。

(11) 对于产品的验收试验来说, 为了找出设备在工作期间的临界点, 必须施加足够数量的正、负极性测试脉冲, 必要时允许更换设备内部的保护器件。

试验结果的判定方法参照静电抗扰度试验。

9.2.4 电压瞬时跌落、短时中断和电压渐变的抗扰度试验及设备

与低压电网连接的电气、电子设备会受到电网中电压暂降、短时中断和电压变化的影响。有时会出现两次或更多次连续的暂降或中断。造成这些电压变化的原因是电网、电力设施的故障或负荷突然出现大的变动。电压变化是由于连接到电网的负荷连续变化引起的。这些现象本质上是随机的，其特征可以用偏离额定电压量及持续时间来表达。电压暂降和短时中断不总是突发的。有些设备对电压的渐变比对电压的突变更为敏感。为了保护和存储内部存储器的数据，大多数数据处理设备装有内置式断电检测器，以便在电源电压恢复后，设备按正确的方式起动。然而有些断电检测器对电源电压逐渐降低不能快速反应，因此，加在集成电路上的直流电在断电检测器触发之前会减小到最小运行电压的水平，并且数据将会丢失或改变。当电源电压恢复时，不重新编程，数据处理设备就不能正确再起动，这就干扰了电气、电子设备的正常工作。

(1) 电压瞬时跌落。电压瞬时跌落指在电气系统某一点的电压突然下降，经历半个周期到几秒钟的短暂持续期后又恢复正常。

(2) 短时中断。短时中断指供电电压消失一段时间，一般不超过 1min。短时中断可以认为是 100%幅值的电压瞬时跌落。

(3) 电压渐变。电压渐变指供电电压逐渐变得高于或低于额定电压，变化的持续时间相对于周期来说可长可短。

9.2.4.1 试验等级

以设备的额定电压 (U_N) 作为规定试验等级的基准。当被试设备有一个明确的适用电压范围，而又不超过额定电压范围规定的低端电压值的 20%时，可在适用电压范围内选定一个电压作为确定试验等级的基准。在其他情况下，应在电压范围规定的低端电压和高端电压下分别进行试验。

试验等级和持续时间可根据设备的使用条件和电网情况来选定。

(1) 电压瞬时跌落和短时中断。优先选用的试验等级和持续时间见表 5.8-21。0% U_N 的试验等级即为电压完全中断。图 5.8-45 为电压瞬时跌落的一个例子。

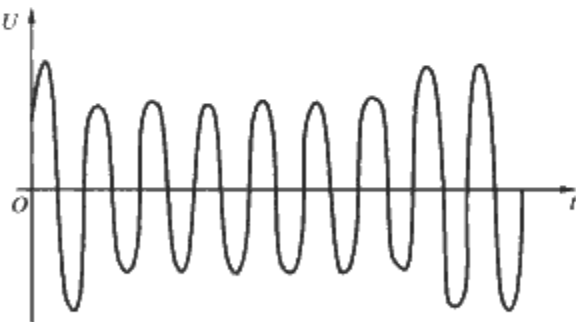


图 5.8-45 电压瞬时跌落

注 电压减小到 70%后，持续 10 个周期，在过 0 处跃变。

表 5.8-21 电压瞬时跌落和短时中断
试验的优先选用的试验等级和持续时间

试验等级 (% U_N)	电压瞬时跌落和短时 中断 (%)	持续时间 (周期)
0	100	0.5 1
40	60	5 10

续表

试验等级 (% U_N)	电压瞬时跌落和短时 中断 (%)	持续时间 (周期)
70	30	25 50 X

- 注
1. 可以选择上述一个或多个试验等级和持续时间。
 2. 如果对被试设备进行 100% 的电压瞬时跌落试验，一般不必在相同的持续时间进行其他等级的试验。有些情况（如保安系统或电动装置）除外。
 3. “X” 表示一个未定的持续时间，这个时间可以由产品标准规定。
 4. 对 0.5 个周期，应在正极性和负极性下进行试验，即分别在 0° 和 180° 开始试验。

(2) 电压渐变。优先选用的电压渐变的时间设定见表 5.8-22。电压渐变波形见图 5.8-46。

表 5.8-22 短期供电电压渐变的时间设定

电压试验 等级	电压减小所需 时间(s)	减小电压的维持 时间(s)	电压增加所需 时间(s)
40% U_N	$2 \times (1 \pm 20\%)$	$1 \times (1 \pm 20\%)$	$2 \times (1 \pm 20\%)$
0% U_N	$2 \times (1 \pm 20\%)$	$1 \times (1 \pm 20\%)$	$2 \times (1 \pm 20\%)$
X	特定	特定	特定

注 X 表示一个未定的持续时间，由产品标准规定。

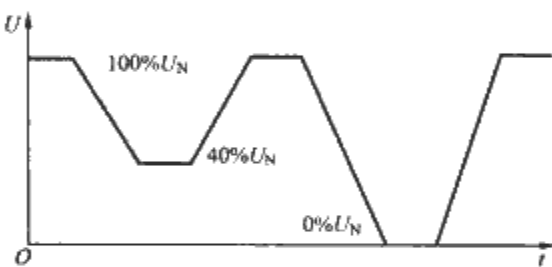


图 5.8-46 电压渐变波形图

9.2.4.2 试验设备

试验信号发生器主要性能如下：

- (1) 输出电压见表 5.8-21，误差为 $\pm 5\%$ 。
- (2) 发生器的输出随负荷变化的误差：100% 输出时在 0~16A 范围内 $< 5\%$ ，70% 输出时在 0~23A 范围内 $< 5\%$ ，40% 输出时在 0~40A 范围内 $< 10\%$ 。
- (3) 输出电流能力为额定电压下每相 16A（有效值）。发生器应能在 70% 额定电压下输出 23A，在 40% 额定电压下输出 40A，持续时间为 5s。
- (4) 峰值冲击电流驱动能力（对电压渐变试验不作要求）。发生器的最大峰值驱动能力应超过 500A（相对于 220~240V 电源）或 250A（相对于 100~120V 电源）。
- (5) 发生器带有 100 Ω 阻性负载时，实际电压的过冲或欠冲应小于电压变化的 5%。
- (6) 发生器带有 100 Ω 阻性负载时，突变过程中电压上升（和降落）时间应为 1~5s。
- (7) 相位变化为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。
- (8) 电压瞬时跌落和短时中断发生时刻与工频的相角应小于 $\pm 10^\circ$ 。
- (9) 发生器输出阻抗主要呈电阻性、低阻抗。

9.2.4.3 试验方法及结果判定

根据受试设备规定，用最短的电源电缆把受试设备与试验信号发生器连接。如果电缆长度没有规定，则应是适合受

试设备所用的最短电缆。试验时，电源电压应在规定的 2% 范围内，发生器的过零控制必须有 $\pm 10^\circ$ 的准确度。

电压瞬时跌落和短时中断试验时，受试设备按每种选定的试验等级和持续时间的组合依次进行三次试验，两次试验之间最小间隔为 10s。电源电压突变发生在电压过零处及标准（或产品技术条件）规定的认为是关键的相角处，如 45° ， 90° ， 135° ， 180° 等。对于三相电源，一般逐相进行试验。对某些产品（如三相电表、三相电源设备），三相必须同时试验。

电压渐变试验时，对受试设备进行的每一种规定的电压变化，都必须进行三次试验，每两次试验之间的间隔为 10s。

试验结果的判定方法参照静电抗扰度试验。

9.2.5 射频电磁场辐射抗扰度试验及设备

强电磁场辐射源可由发射台、雷达天线产生，也可能是由其他工业用电磁源（如高频炉等）产生的，这类源一般在 30m 外可产生大于 10V/m 的电磁辐射；弱电磁场辐射源是由感性负载或容性负载（如晶闸管产品、电感式荧光灯、电子式荧光灯、电视机、电脑产品等）在起动或工作时产生的。由于外界电磁场的作用会引起电子、电器设备的工作状态的改变，甚至造成某些电路的损坏。为评定产品对这类射频电磁场抗扰度的水平，进行射频电磁场抗扰度试验。

9.2.5.1 试验等级

表 5.8-23 给出未调制信号场强的试验等级，试验时以 1kHz 的正弦波对未调制信号进行 80% 调幅，以模拟实际工况，输出端波形如图 5.8-47 所示。频率范围为 80~100MHz。

表 5.8-23 射频电磁场辐射抗扰度试验等级

等 级	试验场强 (V/m)	等 级	试验场强 (V/m)
1	1	3	10
2	3	X	特定

注 X 是一个未定等级，这个等级可在产品技术规范中规定。

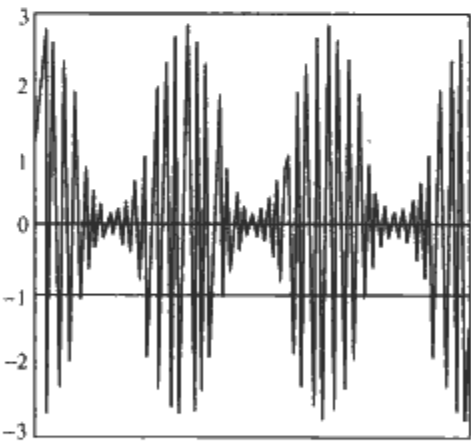


图 5.8-47 信号发生器输出端的波形

9.2.5.2 试验设备及场地

(1) 电波暗室。大型电波暗室相对于受试设备应具有足够的空间，在受试设备周围有场强均匀性（即均匀域），这是一个假想的垂直平面，在该平面中场的变化足够小。替代设备为横电磁波传输室、带状线、局部暗室和开阔场。

(2) 电源干扰滤波器。连接线路的电源干扰滤波器不应饱和及产生谐振。

(3) 信号发生器。信号发生器能覆盖测试频段，以 1kHz 正弦波调幅至 80%，并具有慢于 1.5×10^{-3} （10 倍频程/s）的自动扫描功能。如带有频率合成器，则要求对频率步进幅度和停顿时间进行编程，此外还须具有手动设置

功能。

(4) 功率放大器用于放大未调制和已调制的信号，能提供给天线输出所需场强电平，放大器产生的谐波和失真低于载波电平 15dB。

(5) 发射天线可用符合要求的双锥形、对数周期或其他极化天线。

(6) 垂直与水平极化或各向同性场强监视天线。采用总长度约为 0.1m 或更短的偶极子天线，它是置于被测场强中的前置增益和光电转换装置。它具备足够的抗扰度，配有与室外指示器相连的光纤电缆，也可用能监视水平和垂直极化的场强探头。

(7) 记录功率电平的辅助设备。用于记录试验规定的场强所需功率电平和控制试验场强电平。

9.2.5.3 试验方法

(1) 试验布置。

1) 被试品的布置。受试设备尽可能在实际工作状态下进行试验，如额定电压、额定电流等。典型的试验布置平面图如图 5.8-48 所示。

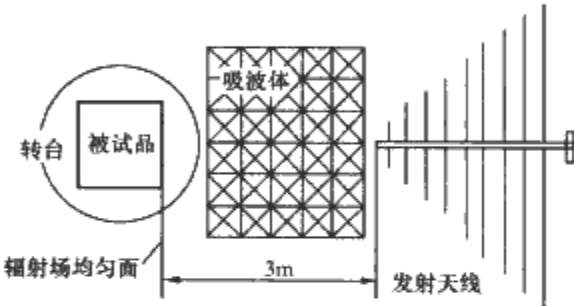


图 5.8-48 典型的射频电磁场抗扰度试验布置平面图

台式设备如塑料外壳式断路器等可置于非金属转台及支架上，支架离地高度为 0.8m，落地式（如较大型的智能型万能式断路器）应放置在高出地面 0.1m 的非金属支撑物上。

2) 受试设备的布线。受试设备本体之间的布线应使用生产厂规定的导线类型和连接器。如果对受试设备的进线进行规定，则要求采用非屏蔽的平行导线，暴露在电磁场中的连线与受试设备距离应为 1m；如果生产厂规定长度不大于 3m，则按生产厂规定的长度用线，把导线捆扎成 1m 长的线束，其感应较小；如果生产厂规定导线长度大于 3m 或无规定，则受辐射的线长为 1m，其余可套有射频损耗的铁氧体以作去耦处理。

(2) 试验程序。

1) 被试品应在其技术条件规定的运行和气候条件下进行试验。

2) 校验标准场。抽校方格上的一些节点，在 80~1000MHz 频率范围内以水平和垂直两种极化方式校验均匀域时，记录的发送正向功率与强度的对应关系是否一致。

3) 采用校准场、获得数据，产生试验场。

4) 被试品的一面布置应与均匀面重合。

5) 以 1kHz 正弦波对信号进行 80% 的幅度调制，在 80~1000MHz 频率范围内进行扫频测量，扫描步长应不超过前一频率的 1%。

6) 每一频率的停留时间不应短于被试品操作反应所需的时间。

7) 受试的各个侧面均应在发射天线的水平和垂直极化下进行试验，或使用转台使各个侧面均受到辐照。

8) 测量距离优先采用 3m。

试验结果的判定方法参照静电抗扰度试验。

9.2.6 对射频场感应的传导骚扰的抗扰度试验及设备

由射频发射机，如中短波发射机、调频发射机和电视发射机，产生的空间电磁场可以在敏感设备的各种连接 25 000 馈线上感应电流（或电压），作用于设备的敏感部分，对设备产生骚扰。各种骚扰源也可能通过连接到设备上的电源线直接对设备产生骚扰。

来自射频发射机的电磁场作用于电气、电子设备的电源线、通信线、接口电缆等连接线路会产生传导骚扰，对射频场感应的传导骚扰的抗扰度试验就是考核这种影响的试验，其频率范围为 9kHz~80MHz。

9.2.6.1 试验等级

对于不同试验等级，开路试验电平不同。表 5.8-24 给出了以有效值表示的未经调制的开路试验电平。

表 5.8-24 对射频场感应的传导骚扰的抗扰度试验等级（频率范围 150kHz~80MHz）

等级	电压 U_0 (dBμV)	电压 U_0 (V)
1	120	1
2	130	3
3	140	10
X	特定	特定

注 X 是一种未定的等级。

9.2.6.2 试验设备

(1) 试验信号发生器。射频信号发生器 G1 应能覆盖规定的频率范围，用 1kHz 正弦波调幅，调制度为 80%，具有慢于 1.5×10^{-3} （10 倍频程/s）的自动扫描功能和手动功能，或在具有频率合成器时，频率步进大小和驻留时间可编程。

未调制时试验信号发生器的特性见表 5.8-25。

表 5.8-25 试验信号发生器的特性

输出阻抗	50Ω，驻波比≤1.2
谐波和失真	比载波电平低 15dB 以上
幅度调制	内调制或外调制，调制度 80%±5%，频率 $1 \times (1 \pm 10\%)$ kHz 的正弦波
输出电平	足够高，能满足试验电平

(2) 耦合和去耦装置。为了使试验信号很好地耦合到与受试设备相连的各种电缆上，应该采用耦合去耦装置。该装置应在规定的频率范围内具有规定的共模阻抗，从受试设备端口看进去的共模阻抗应符合表 5.8-26 的规定。

表 5.8-26 耦合去耦装置的主要参数

参 数	0.15~26MHz	26~80MHz
$ Z_{\text{cm}} $	$(150 \pm 20) \Omega$	$(150 \pm \frac{60}{\sqrt{f}}) \Omega$

1) 直接注入装置。来自试验信号发生器的信号通过 100Ω 电阻注入同轴电缆的屏蔽层上。

2) 耦合和去耦网络 (CDNS)。这些网络包含的耦合电路是装在一个盒子中的，它们可用于特定的非屏蔽电缆，如 CDN-M1、CDN-M2、CDN-M3、CDN-T2、CDN-T4 和 CDN-AF2。网络不对信号的功能产生影响，在产品标准中可规定对这种影响的限制。

3) 注入钳。注入钳的耦合和去耦功能是分开的，由钳耦合式装置提供耦合时，共模阻抗和去耦功能在辅助设备上，辅助设备是耦合和去耦装置的一部分。

a) 电流钳。该装置在连接受试设备的电缆上建立一个

感性耦合，例如，匝变比为 5:1 的电流钳，其共模串联阻抗相对于辅助设备的 150Ω 阻抗可忽略不计。

b) 电磁钳。电磁钳的作用是在连接受试设备的电缆上建立感性和容性耦合。

9.2.6.3 试验方法

试验电路原理与布置，射频传导骚扰抗扰度试验配置如图 5.8-49 所示。

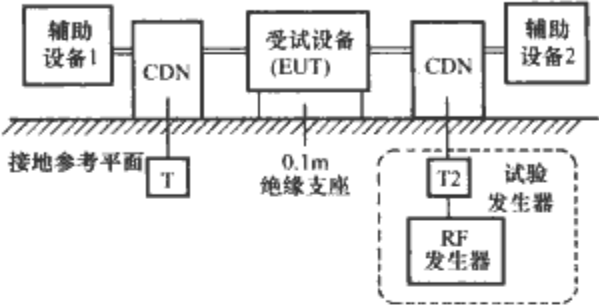


图 5.8-49 射频传导骚扰抗扰度试验配置图

T—端接的 50Ω 电阻；T2—功率衰减器；
CDN—耦合/去耦网络

被试品置于参考平面上 0.1m 厚的绝缘支座上，将耦合和去耦网络 CDN 接入辅助设备和被试品端口之间，对屏蔽电缆是将骚扰信号电流注入电缆的屏蔽层，对非屏蔽电缆是将骚扰信号通过 CDN 注入各条馈线上。以上为共模注入骚扰信号的方法。共模注入点是指被试品注入骚扰信号的点，对连接电缆而言是电缆的屏蔽层，对非屏蔽馈线（如电源线）是指注入网络中 RC 线路与每根线相交的点。

试品电流小则采用 CDN 注入方法，当电流大时采用电磁钳注入方法。无论是直接注入还是用钳注入，均应对骚扰源的电平进行调整，按所需的试验电平进行试验。用于手动或自动方法在 150kHz~80MHz（或 150kHz~230MHz）进行扫描。按试验判据检查被试品的功能和性能是否正常。扫描速率不能超过 1.5×10^{-3} （10 倍频程/s），当扫描频率增加时，步进大小不应超过起始频率的 1%，此后，步进的大小不应超过前一频率值的 1%。

9.2.7 工频磁场抗扰度试验及设备

安装或使用在住宅区、商业区，工矿企业和发电厂、中压和高压变电站环境中的电子、电气设备，需要进行工频磁场抗扰度试验。

9.2.7.1 试验等级

工频磁场抗扰度试验等级见表 5.8-27。

表 5.8-27 工频磁场抗扰度试验等级

等 级	连续场		短持续时间 (1~3s)	
	A/m (峰值)	μT	A/m (峰值)	μT
1	1	1.26	—	—
2	3	3.78	—	—
3	10	12.6	—	—
4	30	37.8	300	378
5	100	126	1000	1260
X	特定	特定	特定	特定

注 1. 表 5.8-27 为 50Hz 配电网中稳定和短持续时间作用的磁场试验等级的优先范围。
2. 磁场强度用 1A/m 表示，1A/m 相当于自由空间的磁感应强度为 1.26μT。

工频磁场抗扰度试验等级的选择要符合实际安装和环境条件。

(1) 1 级：采用有电子束的灵敏装置能够使用的环境条件，如计算机监视器、电子显微镜等。

(2) 2级: 保护良好的环境, 如家用电器、办公机械和医用设备等受保护的区域、工业设备区和高压变电站等。

(3) 3级: 受保护的环境, 如商业区、控制楼、非重工业工厂区, 以及高压变电站的计算机室等。

(4) 4级: 典型的工业环境, 如重工业工矿和发电厂的现场, 以及高压变电站的控制室等。

(5) 5级: 严酷的工业环境, 如重工业厂矿的开关站、中压和高压变电站等。

(6) X级: 特殊环境, 可根据干扰源与设备的电路、电缆和线路等之间的电磁隔离及设施质量, 采用高于或低于上述等级。

9.2.7.2 试验设备

(1) 试验发生器。工频电流源由接到电网上去的电压调整器等构成, 变压器为电感线圈及控制电路供电, 可做短持续时间的试验, 试验磁场波形为工频波形。试验发生器应具有连续方式的试验, 输出电流为 $1\sim 100\text{A}$ 。按线圈因数分挡, 对短持续时间试验, 输出电流为 $300\sim 1000\text{A}$, 总畸变率小于 8% , 短时试验时间的可调范围为 $1\sim 3\text{s}$ 。

(2) 感应线圈。感应线圈有如下三种基本形式:

1) 正方形单匝感应线圈。标准尺寸为边长 1m 的正方形线圈或直径为 1m 的圆形线圈, 用于试验小型台式设备, 其场均匀性为 $\pm 3\text{dB}$ 以内, 试验区体积 (长 \times 宽 \times 高) 为 $0.6\text{m}\times 0.6\text{m}\times 0.5\text{m}$ 。

2) 正方形的双线圈—赫尔姆兹线圈。它是由适当隔开的两个线圈组成, 每个线圈由两匝或多匝线圈组成, 相距 0.8m 的标准尺寸双重线圈, 其场均匀性为 $\pm 3\text{dB}$ 以内, 试验容积 (长 \times 宽 \times 高) 为 $0.6\text{m}\times 0.6\text{m}\times 1\text{m}$ 。这种线圈用于较大的台式试验设备。

3) 立式或大型设备用的单匝感应线圈。感应线圈根据被试设备的尺寸和场的不同极性制造, 线圈包围被试设备, 其大小应使得线圈的一边到被试设备外壳的最小距离等于被试设备尺寸的 $1/3$, 试验的体积是由线圈的试验面积 (一边的 $60\%\times$ 另一边的 60%) 乘以深度 (相对于线圈较短边的 50%) 来确定。线圈每一边比被试设备大出 $25\sim 30\text{cm}$ 。

9.2.7.3 试验方法

(1) 试验布置。

1) 接地 (参考) 平面应放置在实验室内, 被试设备和辅助试验设备应放在接地 (参考) 平面上, 并与其连接, 接地 (参考) 平面最小尺寸为 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 。

2) 被试设备的布置和连接要满足其功能的要求, 设备放在接地 (参考) 平面上, 两者之间有 0.1m 厚的绝缘支撑。

设备外壳应经被试设备的接地端子, 用最短的连线与接地 (参考) 平面上的安全接地直接连接。

受试设备电源电路的输入和输出电路应经防逆滤波器与电源、控制和信号源连接, 应使用由生产厂提供或推荐的电缆。若没有推荐, 应采用无屏蔽的电缆, 所有电缆应有 1m 长度暴露于磁场中。防逆滤波器应接在离被试设备 1m 长的电缆处, 并与接地平面连接。通信线 (数据线) 应由技术要求或使用标准中给出的电缆连接到被试设备。

3) 试验发生器应放在距感应线圈至少 3m 处, 其一端应与接地 (参考) 平面连接。

4) 感应线圈按规定应围住放在其中心处的被试设备, 对不同的垂直方向的试验可选择不同尺寸的感应线圈。在垂直位置 (水平极化场) 使用的感应线圈能直接与接地 (参考) 平面连接, 接地 (参考) 平面作为线圈一部分代替线圈

的底边, 这时从被试设备到接地 (参考) 平面最短为 0.1m 。

(2) 实验室条件。

1) 大气条件: 环境温度为 $15\sim 35^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 $25\%\sim 75\%$, 大气压力为 $86\sim 106\text{kPa}$ 。

2) 电磁条件: 实验室背景电磁场应至少比所选的试验等级低 20dB 。

(3) 试验的实施。试验应根据试验方案进行, 建立不同类型试验磁场 (连续场或短持续场), 以及对被试设备技术条件要求中所定义性能的检验。

1) 电源、信号和其他功能电量应在额定值范围内使用。

2) 如果不能得到真实的操作信号, 可采用模拟信号。

3) 应在施加磁场之前进行设备性能的预检验。

采用浸入法对被试设备施加磁场, 对固定设备用邻近法确定灵敏部位, 试验等级应不超过产品技术要求。

4) 对台式被试设备布置, 被试设备处于感应线圈产生磁场中, 随后感应线圈应旋转 90° , 使被试设备暴露在三个不同垂直方向的磁场中。

5) 对立式被试设备, 用适当大小感应线圈, 通过移动感应线圈来重复进行, 以试验被试设备的整个体积在三个不同垂直方向的情况, 试验以线圈最短一边的 50% 为步长移动感应线圈, 沿被试设备的侧面将感应线圈移动到不同位置重复进行。为使被试设备暴露在不同方向的磁场中, 感应线圈应旋转 90° , 接着按相同程序进行。

9.3 低压电器主要产品的电磁兼容试验项目

国家标准中, 对低压电器产品, 如有剩余电流保护的断路器 (CBR)、带电子过电流脱扣器的断路器、控制与保护开关电器、家用和类似用途剩余电流保护器、电磁接触器和电动机起动器、交流半导体电动机控制器和起动器、半导体开关元件和控制电路装置、接近开关、自动转换开关电器等均规定了相关的 EMC 试验要求及性能判定标准。

10 其他试验及设备

在低压电器的试验中, 除需要使用上述试验设备外, 还要使用一些其他试验设备和操动机构, 来满足各种类别电器产品的试验要求。下面就主要专用设备作简单的介绍。

10.1 外壳防护等级试验设备

标准规定电器外壳应具有以下两种防护型式:

1) 防止人体触及或接近壳内带电部分和触及壳内的运动部件 (光滑的转轴和类似部件等非危险运动件除外), 以及防止固体异物进入电器外壳内部。

2) 防止水进入电器外壳内部而引起有害的影响。

符合设计规定的外壳, 在正常使用条件下应能保证其性能符合规定的防护要求。

电器的外壳防护等级试验设备分为固体和液体两大类。固体试验设备是模拟人体或固体异物进入壳内触及带电部分的程度的设备, 用以评价电器外壳对人体及外界固体异物的防护程度。同理, 液体 (水) 防护等级试验设备是模拟外界水对电器外壳进入程度的设备, 用以评价电器外壳对液体 (水) 的防护程度。

10.1.1 防止固体异物和人体触电的防护等级试验设备

模拟外壳对外界各类大小固体异物的进入和对人体大面积部位和手指的触电可能进行验证, 以判别外壳对固体异物的进入和人体触电的防护能力。

(1) 球形试具。球形试具是模拟固体异物和人体对外壳

的进入程度的试具，其结构如图 5.8-50（单位 mm）所示。

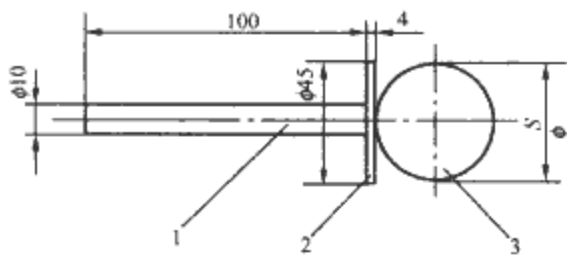


图 5.8-50 球形试具
1—绝缘手柄；2—绝缘挡板；3—金属刚性试球

图中，钢球直径 $(S)\phi = 50^{+0.05}_{-0}$ mm 时适用于 IP1X 等级的试验，当钢球直径 $(S)\phi = 12.5^{+0.2}_{-0}$ mm 时适用于 IP2LX 试验， $\phi 50$ 模拟人的手背。

(2) 指形试具。指形试具是模拟人的手指的器具，其结构如图 5.8-51（单位 mm）所示。

试指用金属制成，尺寸公差：角度公差， $-10'$ ；直线尺寸， ≤ 25 mm 时公差为 -0.05 mm， > 25 mm 时公差为 ± 0.2 mm。

为了模拟手指关节，试指的两个铰接点在同一平面内沿同一方向在 $90^{\circ} \pm 10^{\circ}$ 范围内移动。

指形试具适用于 IP2LX 等级的试验。

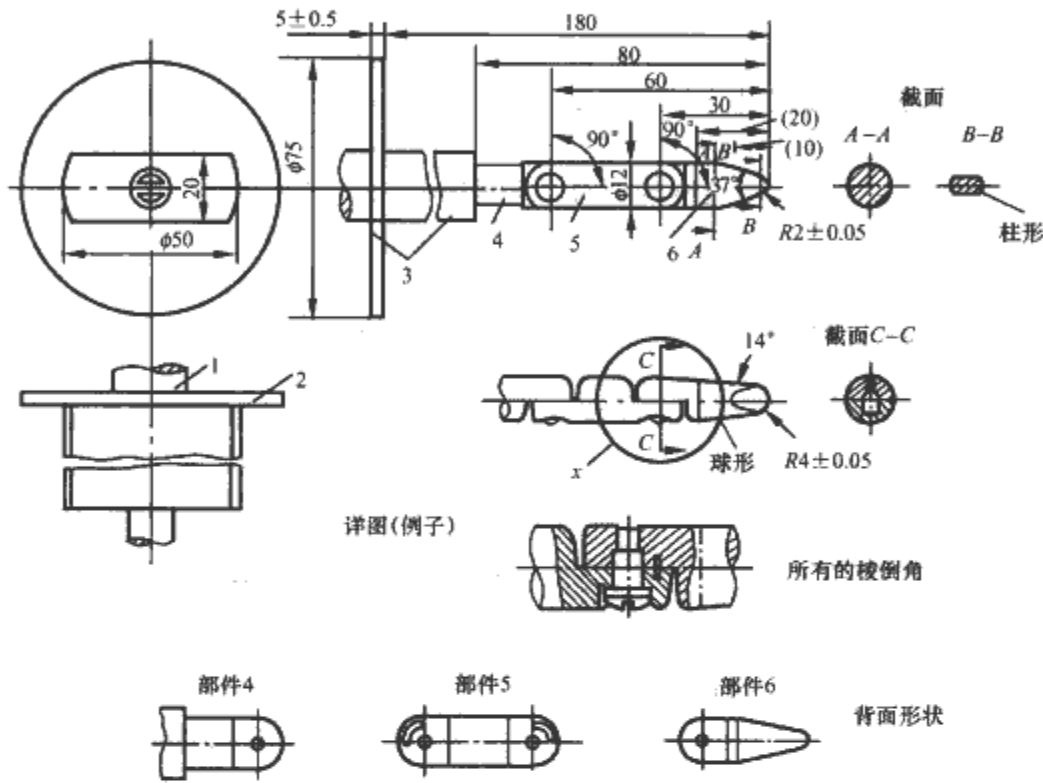


图 5.8-51 指形试具
1—手柄；2—止挡板；3—绝缘材料；4~6—部件

(3) 棒形试具。棒形试具是模拟固体异物对外壳进入程度的试具，其结构如图 5.8-52（单位 mm）所示。

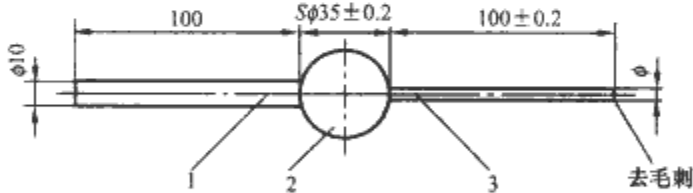


图 5.8-52 棒形试具
1—绝缘手柄；2—绝缘挡盘；3—金属刚性试棒（线）

试具右端的端面棱边应去毛刺，以保证不刺伤外壳和减小进入外壳的阻力，试棒用金属制成，也可以为试针、试验线。

试棒直径 $\phi = 2.5^{+0.05}_{-0}$ mm 时适用于 IP3X 和 IP3LX 的试验中，当进行 IP3LX 等级检验时，试棒端面应加工成半球面。

试棒直径 $\phi = 1^{+0.05}_{-0}$ mm 时适用于 IP4X 和 IP4LX 等级的试验，当进行 IP4LX 等级检验时，试棒端面应加工成半球面。

(4) 防尘试验设备。防尘试验设备是模拟外界固体尘埃对外壳进入的设备，以评定尘埃对产品外壳的进入程度和对工作性能的影响程度。防尘试验设备的结构如图 5.8-53 所示。

图中，筛网尺寸：筛孔 $75\mu\text{m}$ ，筛丝 $\phi = 50\mu\text{m}$ ，真空泵

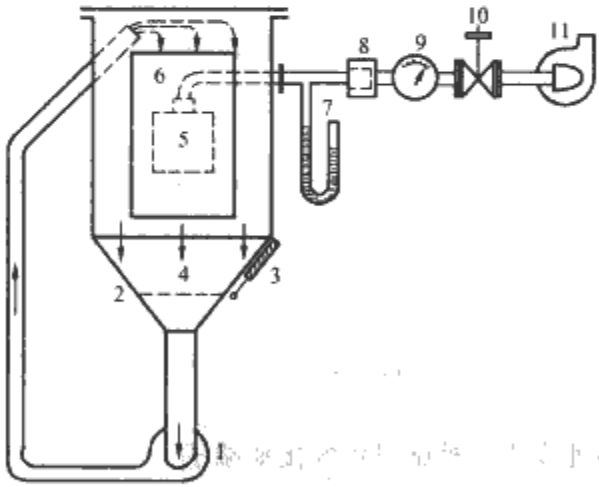


图 5.8-53 防尘试验设备的结构
1—循环泵；2—筛网；3—振动器；4—滑石粉；5—试品；6—玻璃窗；7—压力计；8—滤尘器；9—空气流量表；10—阀门；11—真空泵

应能使壳内外压差达 1.96kPa，空气量可以调节。抽真空的目的是产生压差，加速携带尘埃的气流进入试品壳内。

本试备适用于 IP5X 和 IP6X 等级的试验中。

10.1.2 防水试验设备

防水试验设备模拟水以各种不同的方式和条件进入外壳，以考核水对外壳的进入程度和产生有害影响的程度的试验设备，它可以分为滴水、淋水、溅水、喷水和浸水等各种试验设备。浸水和潜水试验设备即为一水箱。

(1) 滴水试验设备。滴水试验设备是人工模拟降雨的办法产生滴水，考核外壳对降雨的适应程度的设备，其结构原理如图 5.8-54 (单位 mm) 所示。

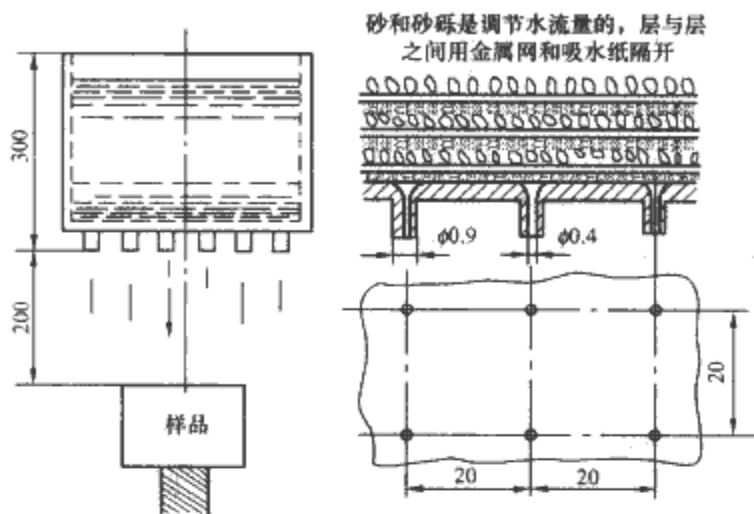


图 5.8-54 滴水试验设备

注：支承物应小于样品。

本试验设备适用于防滴和 15°防滴试验，对应于 IPX1 和 IPX2 等级的防水试验。其降雨量为每分钟 3~5mm，滴水应均匀分布。试品安装可倾斜（用于 IPX2 等级）固装。

(2) 摆管式淋水和溅水试验设备。摆管式淋水和溅水试验设备可产生淋水和溅水作用效果，以便对产品承受与垂直线成 60°范围内的淋水和溅水时产生的有害影响进行评价，它是用通以一定压力水的摆管来产生淋水和溅水作用的。其结构如图 5.8-55 (单位 mm) 所示。

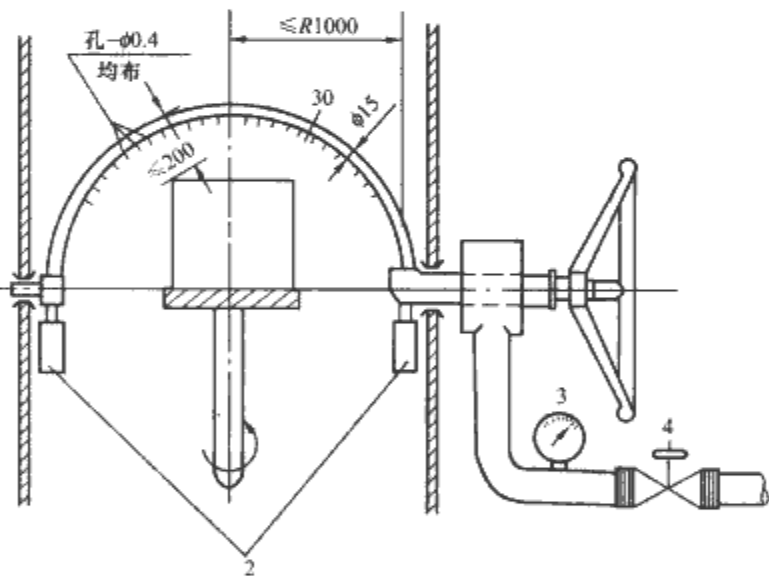


图 5.8-55 摆管式淋水和溅水试验设备的结构

1—样品；2—平衡锤；3—压力表；4—阀门

摆管上喷水孔应均布，水压应能调到 80kPa，摆管能沿垂线两边各摆动 60°，固定试品的转台应能旋转使其各部分均被淋湿，本设备适用于 IPX3 和 IPX4 等级的防水试验。摆管在中心点两边 60°角内布有喷水孔时适应于 IPX3 等级试验，当摆管在 180°半圆内布满喷水孔时适应于 IPX4 等级的试验。

(3) 手持式淋水和溅水试验设备。本设备的适用范围与摆管式淋水和溅水设备相同。当摆管的半径大于 1m 时，就使用手持式淋水和溅水试验设备，此设备适用于较大体积产品的试验，电器元件一般不采用，但在电器控制装置中时有采用。其结构如图 5.8-56 (单位 mm) 所示。

图 5.8-56 中，喷头用黄铜制成，活动挡板可用铝制成；喷头上 $\phi 0.5\text{mm}$ 的孔共 121 个，其中一个孔在中央；里面两圈共 12 孔，间距 30，外面 4 圈各 24 孔，间距 15。喷水率为 $(10\pm 0.5)\text{L/min}$ ，可调节。

(4) 喷水试验设备。喷水试验设备可制造喷水、强烈喷

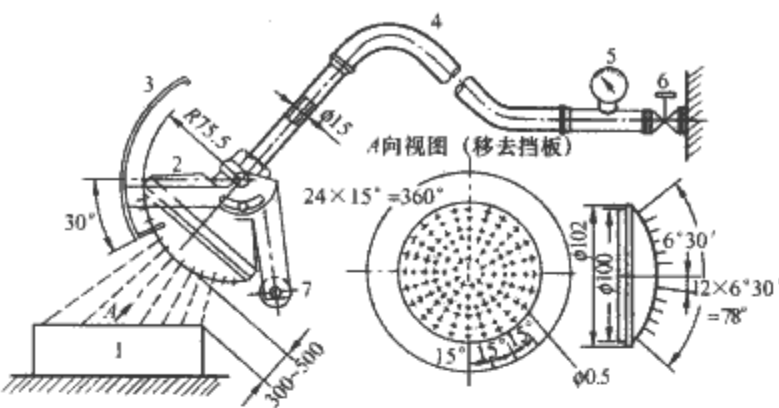


图 5.8-56 手持式淋水和溅水试验设备的结构

1—样品；2—喷头；3—活动挡板；

4—蛇管；5—压力表；6—阀门；7—平衡锤

水和猛烈海浪冲击的效果和模拟作用，考核试品外壳对水的抵御程度和产生有害作用的程度，评价外壳对该环境条件下的适应性。喷水试验设备由压力水制备系统、管路和喷嘴组成，其中关键部分为喷嘴，喷嘴形状如图 5.8-57 (单位 mm) 所示。

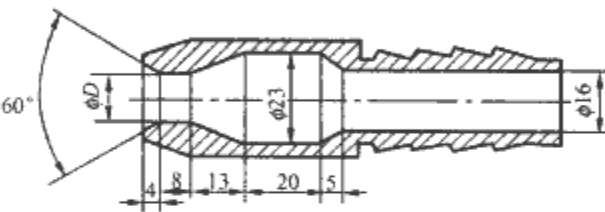


图 5.8-57 喷水试验标准喷嘴

喷水试验设备适用于 IPX5 和 IPX6 等级的防水试验，两者不同于喷嘴内径 D 、喷水率和水压，条件区别见表 5.8-28。

表 5.8-28 IPX5 和 IPX6 试验条件对照表

等级	喷嘴内径 D (mm)	喷水率 (L/min)	喷嘴水压 (kPa)
IPX5	6.3	12.5 ± 0.625	30
IPX6	12.5	100 ± 5	100

10.2 耐振动和冲击试验设备

10.2.1 振动试验台

在低压电器试验中，常用正弦振动试验来模拟产品在工作、运输和储存过程中可能经受到的预期的振动效应。在实验室内，用振动试验台来产生该预期的振动作用，以考核产品在该振动条件下的可靠性、稳定性和牢固性。

(1) 振动试验台的分类。根据产生振动的激励方式，振动试验台可分为三种：

1) 机械振动试验台。机械振动试验台是利用机械振动的方法（如凸轮、弹簧等）使工作台产生正弦机械振动的一种设备，一般由台体、控制装置、参数测量和显示装置组成。机械振动台应符合 GB/T 13309—2007《机械振动台技术条件》的要求。

2) 电动振动台。电动振动台是利用电磁机构产生的电磁力使工作台产生机械振动的试验设备，一般由台体、激励电源、功率放大器、控制装置和测量装置组成。电动振动台应符合 GB/T 13310—2007《电动振动台》的要求。

3) 液压振动台。液压振动台是利用液压系统的液压力使工作台产生机械振动的一种试验设备，一般由台体、液压系统、控制和测量装置组成。

振动试验台就其振动产生的方向一般又可分为单坐标、双坐标和三坐标式。

(2) 振动试验台基本要求。为了适应低压电器振动试验的要求, 试验台应具备以下基本功能:

- 1) 试验台基本运动为时间的正弦函数, 能输出 10~150Hz 范围内可调频率的振动。
- 2) 振动的振幅可在一定范围内调节, 如 10mm 以内。
- 3) 振动台应具备扫频振动和定频振动功能, 扫频振动是连续的并随时间按指数规律进行变化的变频运动。
- 4) 具备一定的负载能力, 工作台尺寸满足产品要求。
- 5) 具有一定的加速度, 波形失真在规定范围内。

10.2.2 冲击试验机

冲击试验机是采用状态模拟技术, 人工模拟产品在使用和运输过程中预期承受非多次重复性机械冲击状态的试验设备, 用以评定产品耐冲击的适应性和结构的完好性。

它也可以采用机械、电磁或液压的方法来产生规定波形的冲击运动。

冲击作用的脉冲波形可分为半正弦波、后峰锯齿波和梯形波三种。冲击试验机应具有以下特性:

- (1) 基本脉冲。应符合波形要求产生规定形状的冲击脉冲波, 并符合容差要求, 参考线和零加速度的差额不超过规定值 (如 $\pm 0.05\text{A}$ 或 $\pm 10\text{m/s}^2$ 、 $\pm 1\text{g}$)。
- (2) 速度变化。冲击脉冲速度变化的容差应在标称值的 $\pm 10\%$ 内。
- (3) 横向运动。垂直于冲击方向的正负加速度值不得超过标称脉冲加速度值的 30%。
- (4) 冲击试验台应有一定的尺寸和具备一定的负载能力 (应包括样品和夹具等)。

10.3 寿命试验及设备

10.3.1 机械寿命试验及设备

电器的机械寿命 (机械耐久性), 是指机械开关电器在需要修理或更换机械零件前所能承受的无载操作循环次数。

所谓无载是指电器的主触头电路不通电。所谓操作循环是指电器的可动部分从起始位置转换到终点位置再返回到起始位置的连续操作。对一般机械开关电器来说, 一个操作循环应包括闭合一次和断开一次这样一个工作循环; 对可逆电器 (如正反向操作的转换开关) 而言, 应按正反向各操作一个工作循环才算一个操作循环; 对某些多位置电器 (如凸轮控制器), 怎样操作算一个操作循环, 由产品标准规定。

电器的机械寿命用它的允许操作循环次数来表示, 对于机械开关电器而言, 是依靠可分离的触头的动作来闭合或断开电路的, 其所能允许的操作循环次数是一个主要技术指标, 特别是对操作频繁的电器, 例如接触器, 这一指标更是评价质量的主要依据。如果电器的机械寿命太低的话, 使用不了多久就会损坏, 而需要更换整台产品, 这对用户很不方便。为保证电器能有一定的使用期限, 必须要求电器有一定的机械寿命。显然, 对于频繁操作的电器, 要求其机械寿命高些, 而对于不经常操作的电器, 其机械寿命要求就低些。

电器的机械寿命取决于电器机械结构的牢固程度, 以及零部件的机械强度。

在电器产品标准中, 规定了电器机械寿命的指标。电器进行机械寿命试验的目的, 就是为了考核它的机械寿命能否达到其规定的指标。

除非产品标准中特别说明, 一般电器机械寿命均按非维修型考虑。对于非维修型电器, 在机械寿命试验期间不允许维修或更换任何零件 (某些产品如接触器允许更换触头), 但按产品标准规定做正常的维护 (如加润滑油或适当清理

等) 是允许的。

(1) 机械寿命试验方法的一般规定。试验时, 除被试电器的操作系统外, 其他电路不带负载。

对于手动电器, 试验时可用手进行操作, 也可用模拟人手操作的专用操动机构来进行操作, 但后者应准确地再现手动操作的条件。因为人手施力时有一定的缓冲作用, 操作机构应尽量模拟这一特点, 必须使电器无冲击地操作。

对于电磁式电器, 如接触器等自动电器, 试验时用其本身的电磁系统来操作, 其操作频率应符合有关产品标准的规定。

由于接触器和电磁继电器等产品的机械寿命很高, 可达几百万次甚至上千万次, 因此, 机械寿命试验的时间也要很长。为缩短试验时间, 允许提高试验操作频率, 但必须保证线圈的通电时间应大于电器的动作时间, 并保证被试电器动作清晰, 其可动部分在每次分断后至下一次动作前的间歇时间内保持静止状态, 线圈或其他部件不超过额定温升。对自动电器, 由于操作频率的提高, 会使线圈在单位时间内受到起动电流的冲击增多, 为使线圈温升不超过允许值, 允许对其进行人工冷却。对于装有分励或欠电压脱扣器的断路器和起动器, 至少 10% 的断开操作次数应由这些脱扣器完成。

(2) 试验装置。有些手动电器, 如按钮等的机械寿命高达 100 万次以上, 用手操作工作量太大, 可专用试验装置进行操作, 它是利用凸轮来操作按钮的一种机械装置, 电动机通过减速齿轮箱带动凸轮, 凸轮每转动一周就操作按钮一次。

电磁式电器, 如接触器等, 可用其电磁系统线圈的通、断电来进行操作, 为使操作线圈的接通与分断按图 5.8-58 所示的顺序进行, 就需要顺序控制装置, 一般可采用下列顺序控制装置。

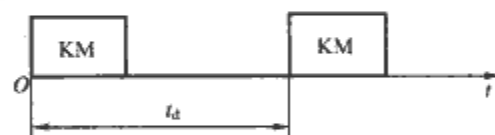


图 5.8-58 接触器动作次序

t_d —一个操作循环周期时间; KM—被试接触器

采用时间继电器的顺序控制装置最为常见, 用两只时间继电器可组合成一种最简单的顺序控制装置, 其内部连接电路如图 5.8-59 所示。图 5.8-59 (a) 中 KT1 和 KT2 是两只相同的释放延时的时间继电器, 其动合触点断开延时, 动断触点闭合延时。图 5.8-59 (b) 中 KM 为被试接触器的操作线圈, 利用时间继电器 KT2 的另一触点来控制。

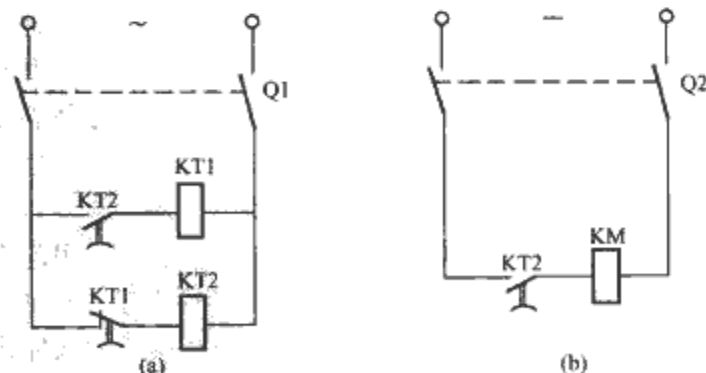


图 5.8-59 时间继电器顺序控制装置

(a) 内部接线电路; (b) 机械寿命试验电路

Q—电源开关; KT—时间继电器; KM—被试接触器

当电源开关 Q2、Q1 先后合闸后, 时间继电器 KT2 线圈通电, 其两个动合触点瞬时闭合, 使被试接触器 KM 的操作线圈及时间继电器 KT1 的线圈同时通电, 被试接触器

吸合,同时KT1也吸合,其动断触点瞬时断开,使时间继电器KT2线圈断电。经一定延时后,KT2的两个延时断开的动合触点断开,使KM的线圈断电而释放,同时使KT1的线圈断电。经一定延时后,KT1的动断触点闭合,使KT2的线圈通电,又使KM的线圈和KT1的线圈通电而开始下一个操作循环。

时间继电器KT2的延时决定了被试接触器线圈的通电时间,而时间继电器KT1的延时决定了被试接触器线圈的断电时间,调节KT1和KT2的延时就可以改变试验的操作频率和负载因数。

采用时间继电器的顺序控制装置具有线路简单、价格低廉等优点,其缺点是操作频率不稳定,由于时间继电器本身的寿命不很高,在试验过程中要经常更换触头或整台时间继电器。

此外,还有采用PLC的顺序控制装置和采用微机控制的顺序控制装置。

(3) 计数方法。机械寿命试验时的计数方法大致有以下几种。

1) 电磁式计数器或计数继电器。这种计数器是由一机械计数器和一电磁机构组合而成,它的工作原理是只要给计数器中电磁铁的线圈通电和断电一次,衔铁就带动机械计数器计一次,因此可以用被试电器的辅助触头来控制计数器电磁铁线圈的通断电,来对操作次数进行计数。

这种计数器的优点是计数不受外界电磁的干扰,也不会因触头闭合时的弹跳而产生误计数,因此计数准确可靠。缺点是位数一般不超过六位,机械部分易磨损,故使用寿命低,当计数器内棘轮机构发生卡住现象时,则会产生计数误差。

2) 电子式计数器。这种计数器是根据逻辑电路原理由集成电路组合而成的静态计数器。其优点是输入计数信号的方式多,具有触点输入、脉冲电压输入及脉冲电平输入等方式;由于没有机械转动部件所以寿命长。缺点是易受外界电磁的干扰,当与触头配合计数时,触头的弹跳易引起误计数。

3) 电子和电磁组合式计数器。它是一种由上述两种计数器组合而成的计数器,其个位和十位是电子式的,而百位以上则是电磁式计数器。其具有寿命长、计数位数多、抗干扰能力强等优点。

4) 同步计时计数法。这是一种间接计数的方法,即用计时的办法来间接计数。对机械寿命较高的电器,可以根据试验所用顺序控制装置的操作频率和试验持续时间来确定试验次数,即试验次数为

$$N = ft$$

式中: f 为操作频率,次/h; t 为试验时间, h。

5) 采用微机控制的顺序控制装置中,微机显示器上可显示计数。

(4) 试验结果的判定。机械寿命试验后的合格准则在各产品标准中规定。

10.3.2 电寿命试验及设备

电器的电寿命是指在规定的接通和分断条件下,电器不需修理和不更换任何零部件所能承受的有载操作次数。电寿命试验时被试电器的触头(对接触器、低压断路器等电器来说,是指它们的主触头)是按产品标准中所规定的试验条件来接通和分断电路的。除此之外,接触器、低压断路器等电器还应按其产品标准中规定的试验条件进行其辅助触点的电寿命试验。各种电器的产品标准中,除了规定其电寿命试验

的试验条件外,还规定了其电寿命次数,电器产品电寿命试验的目的就是考核电器在规定的试验条件下能否达到规定的电寿命次数。以下主要结合接触器介绍其电寿命的试验方法。

(1) 电寿命试验方法的一般规定。

1) 试验前,可以给被试电器的摩擦部分加润滑油。除产品标准另有规定外,在试验过程中,允许每隔总操作次数的1/10~1/5对被试产品进行正常维护。正常维护内容由产品标准规定,一般包括:加润滑油;在不拆卸产品零件的情况下(可以卸下灭弧罩),对整个产品进行清洁工作,其中包括清除粉尘和对触头进行清理。

2) 试验时允许用手操作手动电器,也允许用专门的操作机构进行操作,但后者应当准确地再现手动操作的条件。

3) 应采用产品标准规定的操作频率进行试验,如操作频率对试验结果没有影响,则允许提高试验操作频率。

(2) 试验电路。

1) 主电路。

a) 对于电寿命试验条件中接通条件与分断条件相同的电器(如配电用及照明线路用低压断路器、AC4类交流接触器等),其电寿命试验的主电路与其进行通断能力试验时的主电路完全相同。由于试验时模拟被试电器的正常工作情况,所以负载阻抗应接在被试电器之后,但在试验电源与被试电器之间允许接入不大于试验电路总阻抗值10%的前级阻抗,以限制被试电器在发生相间短路时的故障电流。

电寿命试验时,由于负载阻抗值一般较大,所以在计算负载阻抗值时可以不考虑电源内阻抗。

根据电寿命试验条件中规定的电压值、电流值及功率因数,负载电阻 R 及负载电感 L 可由下式求得,即

$$R = \frac{U}{\sqrt{3}I} \cos\varphi \quad (5.8-12)$$

$$L = \frac{1}{314} \frac{U}{\sqrt{3}I} \sqrt{1 - \cos^2\varphi} \quad (5.8-13)$$

式中: U 为电寿命试验条件中规定的接通或分断电压; I 为电寿命试验条件中规定的接通或分断电流; $\cos\varphi$ 为电寿命试验条件中规定的接通或分断时电路的功率因数。

b) 对于电寿命试验条件中接通条件与分断条件不相同的电器(如AC3类交流接触器),其接通条件为 $I/I_N = 6$ 、 $U/U_N = 1$,分断条件为 $I_c/I_N = 1$ 、 $U_r/U_N = 0.17$ 。由于其接通条件与分断条件不同,这就对试验电路提出了较高的要求。当然,在电寿命试验中,直接用电动机作为试验负载完全可以满足上述试验条件,这样,试验电路比较简单,但它是很不方便的,因为这样试验站必须有一系列标准的电动机,试验做起来也麻烦,此外,也不便于均匀调节试验电流值,所以一般均以结构简单的电阻器与空心电抗器串联作为负载,来模拟真实的电动机负载。这时为了满足AC3类交流接触器的试验条件,一般采用双电源的试验电路,其主电路的原理接线图如图5.8-60所示。

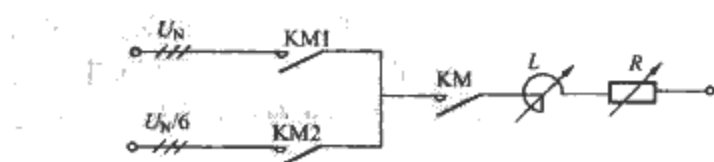


图 5.8-60 AC3 类电寿命试验主电路
KM1、KM2—控制接触器(陪试接触器); KM—被试接触器;
R—负载电阻; L—负载电感

图 5.8-60 中用了两套试验电源,其电压分别为 U_N 及

$U_N/6$ 。

R 与 L 的数值应保证负载阻抗与电源电压 U_N 接通时,主电路的电流值为 $6I_N$,其计算公式如下

$$R = \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} \cos\varphi \quad (5.8-14)$$

$$L = \frac{1}{314} \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} \sqrt{1 - \cos^2\varphi} \quad (5.8-15)$$

式中: $\cos\varphi$ 为电寿命试验条件中规定的电路功率因数。

为了保证被试接触器KM的接通和分断条件满足规定,被试接触器KM和控制接触器KM1和KM2之动作次序应如图5.8-61所示,图中 T 为一个操作周期。

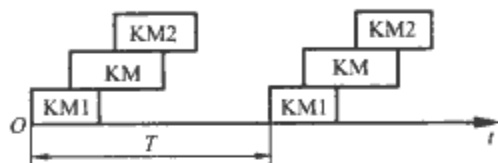


图 5.8-61 控制接触器 KM1、KM2 与被试接触器 KM 的动作次序

试验时,每一操作周期中,KM1 首先闭合,然后被试接触器 KM 闭合,使负载阻抗与电源接通,其接通电压为 U_N ,接通电流为 $6I_N$;之后 KM1 断开,把主电路分断后,KM2 闭合,使负载阻抗与电源 $U_N/6$ 接通,此时主电路中电流刚好为 I_N ;之后被试接触器 KM 断开把主电路分断,其分断电压为 $U_N/6$,分断电流为 I_N ,这样被试接触器 KM 的接通条件与分断条件就满足了规定。

这种双电源的试验电路比较简单,目前各试验站应用也很广泛,但它需要用两套试验电源,并且试验一台接触器要用两台控制接触器,即要用两台接触器陪试,尤其是其中接触器 KM1 要在 U_N 时断开 $6I_N$ 的电流,极易损坏,同时其噪声与弧光都很大,一般 KM1 的容量选择为被试接触器的3倍时,每试验10万次就要消耗一台,很不经济。还由于 KM1 损坏很快,需要相当频繁的维修和更换,使试验工作繁重。为了克服上述缺点,可采用电力半导体的交流接触器电寿命试验装置,即采用电力半导体来取代图5.8-60中的 KM1,从而减少了 AC3 类电寿命试验时陪试接触器的消耗量,也减少了试验时的噪声,还可使试验时的维修工作量也大大减少。

2) 控制电路。采用双电源的试验电路时,接触器 KM、KM1、KM2 动作次序应如前面图5.8-61所示,这就需要采用一套控制电路来保证其动作次序。常用的控制电路有如下几种。

a) 采用凸轮控制器的控制设备。这种控制电路具有线路简单、操作频率也稳定的优点,但其体积大,工作时有噪声,并且凸轮控制器本身寿命不高,易于损坏。

b) 接近开关式控制设备。由于接近开关寿命长,故减轻了试验中的维护工作,也减少了试验时的噪声。

c) 舌簧管式控制设备。舌簧管寿命高(可达 10^8 次),故使试验时维修工作减轻,噪声也减小。

d) 光电式控制设备。这种控制设备与以上接近开关或舌簧管式控制设备的原理基本相同,不过它是利用光电继电器被光照射而动作,当光电继电器与光源被圆盘隔开时光电继电器释放的原理。

此外,随着电子技术的不断发展,采用程序控制器(PC)的控制设备与采用微机的控制设备也已在国内电器试验站中逐步推广使用。

(3) 试验结果的判定。电寿命试验结果的判定应在有关产品标准中规定。

10.4 辅助试验设备

10.4.1 选相合闸设备

在低压大电流试验中时常需要进行选相合闸。如剩余电流动作断路器试验时要分别在不同的电角度合闸;在预期波试验时,为了准确测定回路的功率因数,需要在电压零度附近合闸;动热稳定试验时,为获得最大非周期分量,更要准确地选相合闸。因而,选相合闸控制设备是选相控制系统的核心,是保证试验质量的重要措施。

选相合闸设备是采用人工选择电源合闸相位的办法,使开关在选择的电角度时刻闭合电路的一个电源开关。它广泛用于电器的接通能力、短时耐受电流能力、动作特性、熔断器限流特性、电器动稳定等试验中,以及研究性试验和其他需要选相合闸的场合。

选相合闸完全不同于同步合闸。选相合闸是试验室为依据标准考核试品的一个手段。同步合闸是为了不发生瞬态过程,选相合闸则恰是为了人为制造最严酷的瞬态过程,如最大电流非周期分量。其合闸控制精度一般为3~5电角度,采用专门设计的选相开关。

选相合闸设备一般由选相装置和合闸机构组成。其结构原理如图5.8-62所示。

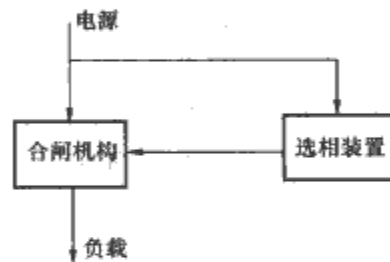


图 5.8-62 选相合闸设备结构原理框图

选相装置是实现合闸相位的精确选择和对合闸机构的准确控制,它能在电角度 $0^\circ \sim 360^\circ$ 间任意选择。选相合闸设备有自整角机选相合闸设备和新型选相合闸控制设备两种。

新型选相合闸控制设备,均为内置高性能微控制器,配以数码管或液晶显示器,可独立使用,是计算机控制的数字化选相合闸控制设备,与传统的选相合闸设备相比,具有选相准确度高(可获得0.1电角度的高精度)、安装使用简易方便、数据存储和掉电保护等特点。

选相控制器的核心部件是基于计算机控制的数字化选相部件及同步信号隔离器,通过隔离器将同步信号(AC电压)馈送到控制部件,控制部件捕捉其零点,并依据整定值在适当角度输出信号。驱动装置将选相控制器核心部件送来的TTL电平信号放大到可控制10A/220V直流电源,以驱动合闸开关的控制柜或相关线圈。

理论上讲,选相开关无论对单相或三相试验都只需要一相。一般设计A、C相安装选相开关,B相直通,这样单相试验时可灵活地选择A、B相或B、C相;三相试验时,B相作为预合相可灵活地选择A相或C相选相,后续相与选相相同步动作。但实际的开关A、C相合闸时间会有差别,因而选相控制器一般有两路输出,正是为了对后续相合闸时间差别的调整。

非常重要的一点是合闸开关一般不具备分断能力。合闸开关在接到选相合闸命令后应自保,待PLC在分断前级开关后解除,以防止前级开关分断前合闸开关分断而导致损坏。因而选相控制系统要与试验控制系统的主控制器(如PLC)协调配合。解决方案可选用带有选相功能的时序控制器取代PLC,使试验主控制系统与选相控制系统成为一整体,若因造价较高而难以接受,采用PLC与选相控制系统组合时应选择有适当辅助触点的合闸开关(如接触器),使选相控制系统可合闸自保,以防止前级开关分断前合闸开关分断而导致

损坏。

10.4.2 程序控制装置

程序控制装置是一种按人工事先编制的顺序而产生有规律和条件的输出控制装置,简称程控器。程控装置可分成机械—电器式、继电—接触器式、半导体式、机械式、数字式、计算机式等多种型式。

程控装置就其原理可分为时间型、条件型、时间—条件型、智能型。程控装置广泛应用于电器的接通和分断能力、温升及电寿命试验中,作为操作主电路中各电动开关的合分,操作被试电器的动作、测量,控制示波器的拍摄等指令的装置,是实现自动化的不可缺少的装置,计算机的使用使程控装置大大提高了智能化水平和工作的可靠性。

早期的程控装置在功能上只能进行逻辑控制,替代以继电器、接触器为主的各种顺序控制。随着计算机技术的应用,使程控装置的功能大大增强。它不仅具有逻辑运算功能,还具有算术运算、模拟量处理和通信联网等功能。目前,在低压电器试验中,很少使用机械式、半导体式、继电—接触器式程控装置,机械—电器式和数字式程控器也在逐步减少,更多的是采用使用计算机技术的可编程序控制器PLC或直接使用微型计算机。

可编程序控制器还具有完善的自诊断功能,检查判断故

障方便,因而便于维修,工作非常方便,所以在试验中已得到广泛的使用。

10.4.3 操动机构

低压电器非电磁式结构产品在进行寿命、功能试验时需要有相应的机械操动机构来进行操作,如手动开关、行程微动开关、按钮开关、插销、光电开关、接近开关等,即需要一个机械手来实现操作运动。机械手有机械式、电磁式、气动式、液压式等,分别用不同的控制系统对其进行控制,这里简单介绍机械式的操动机构。

机械式的操动机构是将电动机单方向的转动,通过凸轮、连杆、滑块、齿条、齿轮等的相互配合,将其转换成往复式直线运动(包括前后、左右、上下)和往复式旋转运动的机械装置。

直线往复式运动适用于对掀钮式按钮、行程和微动开关、主令开关、负荷开关、空气断路器、插销、热继电器辅助开关、磁控开关、光电接近开关等的操作。往复式旋转运动(摆动)适用于钥匙型、旋转型按钮、主令开关、转换开关、组合开关、手动起动器等产品的操作。另外,旋转式连续运动方式还可用于微动开关、接近开关、光电开关、磁控开关、电磁离合器等产品的操作。

参 考 文 献

- [1] 陆俭国, 李志刚. 电器试验技术与试验方法. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [2] 陆俭国, 曾举璋, 张乃宽. 机床电器检验测试手册. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [3] 陆俭国, 张乃宽, 李奎. 低压电器的试验与检测. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [4] 张冠生. 电器理论基础. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [5] 方鸿发, 贾继钧. 电器测试技术. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [6] 袁禄明. 电磁测量. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- [7] 林德杰. 电气测试技术. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [8] 张迎新, 等. 非电量测量技术基础. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [9] 王鸿钰, 等. 电工仪器仪表——原理与使用. 上海: 上海科学技术出版社, 1993.
- [10] 贾民平, 等. 测试技术. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [11] 《计量测试技术手册》编辑委员会. 计量测试技术手册. 第7卷: 电磁学. 北京: 中国计量出版社, 1996.
- [12] 崔玉龙, 刘教民, 李新福. 开关电器试验高速数据采集与处理系统研究. 河北工业大学学报, 2003, 32(2): 25-29.
- [13] 刘教民, 李新福. 开关电弧图像增强算法研究. 电工技术学报, 2005, 20(5): 20-23.
- [14] 陈旭, 陈德桂, 魏强. 低压断路器中电弧运动形态的观察. 低压电器, 2000(1): 9-11.
- [15] 赵子玉, 武建文, 邹积岩, 等. 利用CCD摄像系统研究真空电弧演变过程. 中国电机工程学报, 1999(11): 10-13, 58.
- [16] 袁海文, 陈德桂. 电弧运动图像的光电数字式测试系统. 低压电器, 1998(3): 45-48.
- [17] Jerzy Kaczmarek, et al. Constriction Resistance Measurements Based on the Method of Third Harmonic. The 19th Holm Conference on Electrical Contact, 1973.
- [18] Koichiro Sawa. Contact Characteristics of Ag and Pd Contact under Various Arc-discharge Conditions. IEEE Trans. On CHMT Vol-10, No. 1, 1987.
- [19] 杜太行. 电器试验中计算机数据检测与处理技术. 低压电器, 2000(5): 42-44, 62.
- [20] 陆勤. 低压电器产品动作特性试验装置的设计思路. 江苏电器, 2005(2): 47-48.
- [21] 王剑明, 等. CY2000型选相合闸控制系统的应用. 江苏电器, 2006(6): 21-24.
- [22] 刘松强. 数字信号处理系统及其应用. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [23] 黄纯, 等. 电网频率的微机测量新方法. 电测与仪表, 1998, 35(5): 16-17.
- [24] 陈君, 等. 测算电网频率和谐波的新方法. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(1): 25-27.
- [25] 李奎, 李志刚, 陆俭国. 接触电阻新型测量方法的研究. 电气开关, 1997(6): 26-28, 33.
- [26] Li Kui, Li Zhigang, Su Xiuping, Liu GuoJin, Lu Jianguo. Study on the Method of Reliability Prediction for Contact. 48th Electronic Components and Technology Conference, 1998.
- [27] 钱振宇. 电磁兼容测试和对策技术. 电器技术, 1999.
- [28] 陈伟华. 电磁兼容实用手册. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [29] 陈淑凤, 马蔚宇, 马晓庆. 电磁兼容试验技术. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001.

第6篇 低压成套开关设备和控制设备试验与检测技术

主编单位：天津电气传动设计研究所

国家电控配电设备质量监督检验中心

主 编：陈雪梅 林立功 刘 辉 龙 静 邢合萍 吴晓龙

主 审：文念祖 龙 静

编写人员：陈雪梅（国家电控配电设备质量监督检验中心）

林立功（天津电气传动设计研究所）

刘 辉（国家电控配电设备质量监督检验中心）

龙 静（国家电控配电设备质量监督检验中心）

邢合萍（中国质量认证中心）

吴晓龙（中国质量认证中心）

刘淑敏（国家电控配电设备质量监督检验中心）

赵晓华（国家电控配电设备质量监督检验中心）

赵 静（国家电控配电设备质量监督检验中心）

刘 霞（国家电控配电设备质量监督检验中心）

张 庆（国家电控配电设备质量监督检验中心）

张春香（国家电控配电设备质量监督检验中心）

齐赫男（国家电控配电设备质量监督检验中心）

王作鑫（国家电控配电设备质量监督检验中心）

刘振东（国家电控配电设备质量监督检验中心）

马立勇（国家电控配电设备质量监督检验中心）

徐东明（福建省中心检验所）

第1章 概述

1 产品检测简述

1.1 产品检测、检验

低压成套开关设备和控制设备（简称产品）的设计、生产及质量检验通常是通过试验结果来判定。因此，用于产品的试验标准、试验设备、试验方法，对低压成套设备的试验及发展有着非常重要的意义。

随着低压成套开关设备和控制设备的发展，产品检测向着试验容量增大、试验项目增多、试验设备数字化发展。其中短时耐受强度试验能力已达到 200kA/400V；近年新换版的标准几乎都增加了新的试验项目，例如增加了 EMC、耐火性能等试验项目；同时微机检测、计算机辅助检测及网络化在低压成套开关设备和控制设备的检测领域得到了广泛应用。

低压成套开关设备和控制设备的试验，是专指成套设备的试验。但应注意的是，当成套设备内所装的电器和独立元件按其各自标准进行了型式试验，在成套设备设计选择这些电器、元件时，遵从了成套设备及相关标准要求来选型，并且是按照制造商的说明书进行安装的，则不要求进行型式试验或出厂试验；否则，成套设备内所装的电器和独立元件必须按要求进行型式试验或出厂试验。该规定也是成套设备的试验条款之一。

为减少篇幅，本篇第2章常规试验阐述了低压成套设备通用的、基本的试验，其他章节的试验方法及要求若与该章节相同，则可直接引用。

本篇所述的试验主要依据 GB 7251（等同于 IEC 60439）《低压成套开关设备和控制设备》系列标准、GB/T 10233—2005《低压成套开关设备和控制设备的基本试验方法》以及其相关标准、公开发表的技术文件，在总结多年来低压成套设备的试验经验的基础上，系统地阐述了低压成套设备的试验要求和检测技术。

产品检测是按照规定程序，由给定产品的一种或多种特性、进行处理或提供服务所组成的技术操作。检测的对象是产品，检验的对象也是产品，检验和检测的不同之处主要体现在符合性方面。当根据检测结果与规定要求对被检产品做出符合性判定时，检测就变成了检验。检测依据双方认同的技术文件，仅提供检测数据或对实际情况的描述，在没有明示要求时不必作出符合性判定。

产品检验是产品质量检验的简称。它是在检测产品的一个或多个质量特性的基础上，确定每项质量特性合格情况的技术活动。

为了保证产品质量，还应对生产过程中的元器件、材料、外购件、外协件、半成品、壳体等进行质量检验，做到不合格的原材料不投产、不合格的半成品不转序、不合格的零部件不装配、不合格的产品不出厂，以确保用户和公众利益，维护生产者信誉和提高社会效益。

1.2 检测产品性能的试验分类

检测产品性能的试验通常分型式试验和出厂试验。另

外，还可以只做型式试验项目中的一项或多项试验，通常称为委托试验。

1.2.1 型式试验

型式试验是验证产品是否满足标准要求的试验。

型式试验可在一台产品上进行，也可以在相同设计的多台产品上进行，系列产品应选择具有代表性的产品进行试验。进行型式试验的产品必须是出厂试验合格的产品。

我国低压成套设备的型式试验通常是由制造厂委托有资质的第三方的实验室进行，并严格按照产品的标准（或技术条件）规定的试验项目、试验方法来完成。

1.2.2 出厂试验

出厂试验是用来检查产品的元器件、材料及工艺上的缺陷和对需要调整的电器元件进行电气参数整定，每台产品都应进行出厂试验。

出厂试验通常由制造厂来完成。

本篇所述的型式试验、出厂试验项目是依据国家标准或行业标准，是最基本的检测项目，工厂或有关单位可以根据情况，在技术文件中说明增加某些试验项目。

1.3 产品检测依据

产品的检测依据是技术标准（国家标准、行业标准、企业标准）和其他相关的产品设计文件、图样、工艺制造技术文件，作为质量检验的依据和检验后比较相关结果的参照物或参照基准。

1.4 产品检测的功能和步骤

1.4.1 产品检测的功能

产品检测的功能主要有以下3个：

（1）鉴别功能：判定产品质量是否符合规定的质量特性要求。

（2）把关功能：剔除不合格品，使之不投产、不出厂。

（3）决策功能：汇总、整理、分析检验所获的数据和信息，为质量控制、质量改进以及领导层进行质量决策提供依据。

1.4.2 检测的步骤

产品检测主要分为以下5个步骤：

（1）熟悉技术要求、选择检测方法。首先，了解产品相关标准或技术文件规定的质量特性并确定被测项目及其量值要求；有时需要将某些特性转化为可直接测量的量，或者采取间接测量方法经换算后求得量值。其次，确定检验方法，选择准确度等级适当的计量器具或仪器设备，确定所需的环境条件、被测实物数量，对批量产品还需确定每批的抽样方案。然后，将检验方法/方案以技术文件形式编成规范化的检验细则或作业指导书，或绘成图表形式的检验流程卡等。若为非标或自制的检验方法，还必须加以确认。

（2）检测。按确定的检验方法/方案，对产品质量特性进行定量或定性的检测，求得所需的量值和结果。

（3）记录。将检验、观察得到的技术状态及所得结果以规范化的格式记载并保存。

- (4) 判定。由专职人员根据结果和规定要求，确定每一项质量特性的符合性，从而判定被检验的产品合格与否。
- (5) 签字确认。根据记录和判定的结果，由授权签字人对检测结果（或产品可否接收或放行做出决定）签字确认。

2 与产品检测有关的标志的含义

了解产品检测有关标志的含义及产品检测实验室提供数据的有效性是非常重要的。

2.1 CMA 标志的含义

CMA 是计量认证标志，获得计量认证的检验机构，在其计量认证证书有效期内，允许其检验报告封面的左上方印制或加盖 CMA 标志变形章，见图 6.1-1 (a)。

1990 年，原国家技术监督局发布了《产品质量检验机构的计量认证标志和标志的使用说明》，规定计量认证标志由 CMA 的变形组成，为英文 China Merology Accreditation 的字头缩写。

《中华人民共和国计量法实施细则》第三十二条对计量认证作出明确规定：“为社会提供公证数据的产品质检机构，必须经省级以上人民政府计量行政部门计量认证。省级以上人民政府计量行政部门应指定所属的计量检定机构或者被授权的技术机构进行考核，合格后，由接受申请的省级以上人民政府计量行政部门颁发计量认证合格证书。未取得计量认证合格证书的，不得开展产品质量检测工作。”《产品质量检验机构计量认证管理办法》第六章对计量认证工作进一步作出规定，经计量认证合格的产品质量检验机构所提供的数据，用于贸易出证、产品质量评价、成果鉴定，作为公证数据具有法律效力。

如上所述，为社会提供公证数据的产品质量检验机构必须获得国家认证认可监督管理委员会（简称认监委）和各省、自治区、直辖市质量技术监督部门颁发的计量认证证书，这是我国法律法规的强制性要求。

2.2 CAL 标志的含义

CAL 是国家产品质量监督检验中心资质认定授权标志，

获得资质认定授权的检验机构，在其资质认定授权证书有效期内，允许其检验报告封面的左上方印制或加盖 CAL 标志章，见图 6.1-1 (b)。

国家产品质量监督检验中心的授权、批准，是根据国家需要，按照《国家产品质量监督检验中心的授权的基本条件》进行。对于不同产品检验领域，由国家认监委提出国家产品质量监督检验中心应满足的特殊条件。

2.3 CNAS 标志的含义

CNAS 标志是中国合格评定国家认可委员会英文（China National Accreditation Service for Conformity Assessment）的字头缩写。获 CNAS 认可的实验室可在认可的范围内，允许其检验报告封面印制或加盖 CNAS 国家实验室认可标志 [见图 6.1-1 (c)] 和 ILAC-MRA 国际互认联合标志。

CNAS 依据 CNAS-CL01：2006《检测和校准实验室能力认可准则》（等同采用 ISO/IEC 17025：2005）基本准则开展实验室认可，表明认可实验室具备了按相应认可准则开展检测和校准服务的技术能力；表明实验室具备实施特定检测、校准工作能力，具备了出具技术上有效数据和结果的能力的第三方证明。目前实验室认可是国际通行的做法。

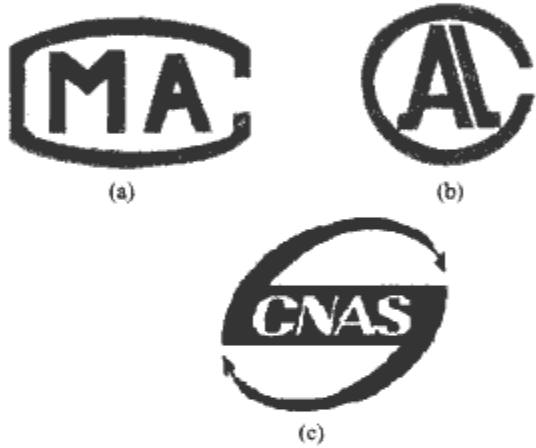


图 6.1-1 CMA、CAL、CNAS 标志
(a) CMA 标志；(b) CAL 标志；
(c) CNAS 标志

第2章 常规试验

1 简述

本章主要阐述低压成套开关设备和控制设备的常规试验方法及检测技术，其中包括温升试验、介电性能试验、短路耐受强度试验、防护措施和保护电路有效性检查、电气间隙和爬电距离的测量、机械操作试验、防护等级试验、连接线、通电操作、绝缘电阻测量、EMC 试验、封闭式低压成套设备在内部故障引起电弧情况下的试验。

本章所述试验方法、检测技术依据 GB 7251.1—2005（等同于 IEC 60439—1：1999）及 GB/T 10233—2005。

本章常规试验是指低压成套设备产品通用的、基本的试验。其他各章试验方法及要求若与本章相同，则可直接引用。

2 温升试验

2.1 试验设备

试验设备包括：调压器、升流器、交流电流表（0.5 级）、电流互感器（0.2 级）、热电偶、温度巡检仪、负载调节装置。

2.2 试验环境条件

（1）应防止空气流动和辐射对温升测量的影响，成套设备应在正常的通风和散热条件下试验。

（2）周围空气温度应在（+10~+40）℃之间。

2.3 试验方法及要求

2.3.1 成套设备的放置及要求

（1）成套设备应如同正常使用时一样放置，所有覆板等都应就位。试验单个部件或结构部件时，与其邻接的部件或结构单元应产生与正常使用时一样的温度条件。此时，可以使用电阻加热器来模拟。

（2）成套设备中所有电器应像正常工作那样闭合，控制电路应带电，电流应加在主进线电路，由出线电路分配电流。

（3）如果成套设备中有熔断器，应按照制造厂的要求配备熔芯。试验所用熔芯的功率损耗应载入试验报告中。

（4）试验所使用的外接导线的尺寸和布置方式应载入试验报告中。

2.3.2 试验电流的确定

（1）进线电路通以额定电流。

（2）每条出线电路通过的电流值为其额定电流乘以额定分散系数。额定电流由制造厂根据其内装电气设备的额定值及其布置和应用情况来确定。如果制造厂给出了额定分散系数，此系数将用于温升试验；如果制造厂没有给出此系数，可以采用表 6.2-1 的常用数据。

表 6.2-1 常用额定分散系数

主电路数	分散系数
2 或 3	0.9
4 或 5	0.8
6~9（包括 9）	0.7
10 及以上	0.6

2.3.3 试验导线的确定

（1）试验电流值不大于 400A 时：①导线应使用单芯铜电缆或绝缘线，其截面积按表 6.2-2 规定的数值选取；②导体应尽可能暴露在大气中；③从一个端子到另一个端子每根临时接线的最小长度在截面积不大于 35mm² 时为 1m，大于 35mm² 时为 2m。

表 6.2-2 用于试验电流 400A 及以下的铜导线尺寸

试验电流的范围 (A)	导线尺寸 ^① (mm ²)	试验电流的范围 (A)	导线尺寸 ^① (mm ²)
0<I≤8	1.0	115<I≤130	50
8<I≤12	1.5	130<I≤150	50
12<I≤15	2.5	150<I≤175	70
15<I≤20	2.5	175<I≤200	95
20<I≤25	4.0	200<I≤225	95
25<I≤32	6.0	225<I≤250	120
32<I≤50	10	250<I≤275	150
50<I≤65	16	275<I≤300	185
65<I≤85	25	300<I≤350	185
85<I≤100	35	350<I≤400	240
100<I≤115	35		

① 为了方便试验，在经过制造商同意后，对规定的试验电流可采用小于给出值的导线。

（2）试验电流值高于 400A 但不超过 800A 时：

1）导线应使用单芯聚氯乙烯绝缘铜电缆，其截面积按表 6.2-3 选择，或者选择表 6.2-3 中给出的等效的铜母排。

2）电缆或铜母排的间隔大约为端子之间的距离。铜母排应涂成无光的黑色。每个端子的多条平行电缆应捆在一起，相互间的距离大约为 10mm。每个端子的多条铜排之间的距离大约等于母排的厚度。如果所要求的母排尺寸不合适或没有这种尺寸的母排，则允许采用截面积大致相同，冷却面积大致相同或略小一些的其他母排。电缆和母排不应交叉。

3）对于单相或多相试验，连接试验电源接线的最小长度为 2m，连接中性点接线的最小长度应为 1.2m。

（3）试验电流值高于 800A 但不超过 3150A 时：

1）导线应使用铜母排，其截面积按表 6.2-3 选择，如果成套设备的设计规定只能用电缆，电缆的尺寸和布置应由制造厂给出。

2) 铜母排的间隔大约为端子之间的距离。铜母排应涂成无光的黑色。每个端子的多条铜母排应以大约等于母线厚度的间距隔开。如果所要求的母排尺寸不合适或没有这种尺寸的母排,则允许采用截面积大致相同,冷却面积大致相同或略小一些的其他母排。铜母排不应交叉。

3) 对于单相或多相试验,连接试验电源的任何临时接线的最小长度为 3m,但如果连接线的电源端的温升低于连接中点的温升不超过 5K,则连接线可减少到 2m。连接中性点的接线的最小长度应为 2m。

表 6.2-3 对应于试验电流的铜导线的标准截面积

额定电流 (A)	试验电流的范围① (A)	试 验 导 线			
		电 缆		铜母排②	
		数目	截面积③ (mm ²)	数目	尺寸③ (mm)
500	400~500	2	150 (16)	2	30×5 (15)
630	500~630	2	185 (18)	2	40×5 (15)
800	630~800	2	240 (21)	2	50×5 (17)
1000	800~1000			2	60×5 (19)
1250	1000~1250			2	80×5 (20)
1600	1250~1600			2	100×5 (23)
2000	1600~2000			3	100×5 (20)
2500	2000~2500			4	100×5 (21)
3150	2500~3150			3	100×10 (23)

① 电流值应大于第一个值,小于或等于第二个值。
② 假设母排是垂直排列的,如果制造厂有规定,也可采用水平排列。
③ 括号内的值为试验导线的温升估计值(以绝对温标 K 表示),仅供参考。

(4) 试验电流值高于 3150A 时,试验导线由用户与制造商之间达成协议来确定。有关试验的所有项目,例如电源类型、相数和频率(如需要的话),试验导线的截面积等,这些数据应作为试验报告的一部分。

2.3.4 温升测量点的确定

应在下列各点测量温升:①内装元件与外部连线的连接处;②用于连接外部绝缘导线的端子;③母线连接处;④母线与导线连接处;⑤导线与导线连接处;⑥连接到母线上的可移动式部件和抽出式部件插接式触点;⑦接插件连接处绝缘材料;⑧与发热元件、发热导体相邻或接触的绝缘材料;⑨分散排列的插头与插座;⑩操作手柄;⑪外壳和覆板;⑫内部空间(布置在发热电器元件附近)。

2.3.5 温升稳定值的确定

(1) 试验持续时间应足以使温度上升到稳定值(一般不超过 8h)。相隔 1h 所测得的温升之差不超过 1K 时,则认为温升已达到稳定。

(2) 为缩短试验时间,只要设备允许,开始试验时可加大电流,电流提高的数值一般不超过额定电流的 1.25 倍,然后再降到规定的额定电流值。

(3) 在试验期间,当控制电磁铁通电时,应测量主电路和控制电磁铁都达到热平衡时的温度。

2.3.6 温升的测量方法

试验时,测温元件可以使用温度计、热电偶或其他有效方法。被试设备内部部件的温升一般采用热电偶法测量。测量时,将热电偶的热端采用胶粘或钻孔埋入法固定到被试部件的测量点上,并尽可能使热电偶置于强交变磁场的作用范围之外。

对于线圈,通常采用测量电阻变化值的方法来测量温度。为测量成套设备内部的空气温度,应在适宜的地方配置几个测量器件。

(1) 胶粘固定法。将热电偶工作点焊在厚 0.1~0.2mm 小铜片上,把被测点与小铜片清理干净,然后将铜片与被测试部位粘贴在一起,例如:在小铜片上涂一层很薄的快干胶(目前普遍采用 502 胶)压在被测点上,待其固化后即可。

502 胶极限使用温度在 80~100℃,而 502 胶产生的热阻会使胶粘固定法测出的温度偏低,故应用式(6.2-1)进行修正,即

t₂ = 1.025t₁ (6.2-1)

式中:t₂ 为修正后的被测点的温度,℃;t₁ 为胶粘固定法测出的温度,℃。

(2) 钻孔埋入法。其方法是先在被测点上钻一小孔,孔的深度和直径略大于热电偶的工作端,然后将热电偶的工作端放入孔中,四周用冲子冲挤固定或用导热性能好的材料填充塞紧。

2.3.7 试验线路

(1) 单相试验线路。试验电流在 400A 以下时,可以考虑使用单相法,试验线路见图 6.2-1,调节调压器、升流器使电路电流达到试验电流规定值。

在任何场合下,只有当磁场的作用小到可以忽略的程度,多相成套设备的试验才允许采用单相交流电。

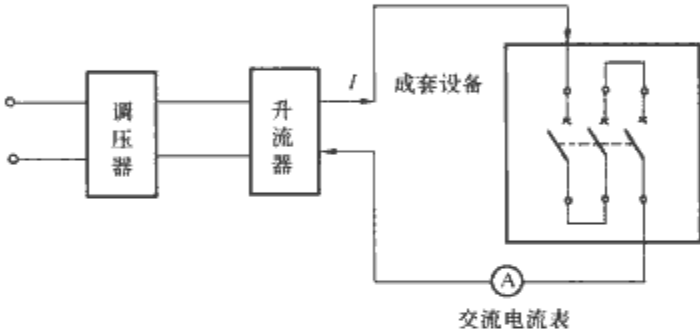


图 6.2-1 单相温升试验线路示意图

(2) 三相试验线路。试验电流大于 400A 时,必须采用三相法。

试验线路见图 6.2-2,调节调压器、升流器、阻抗调节器,使各电路的电流达到试验电流规定值。

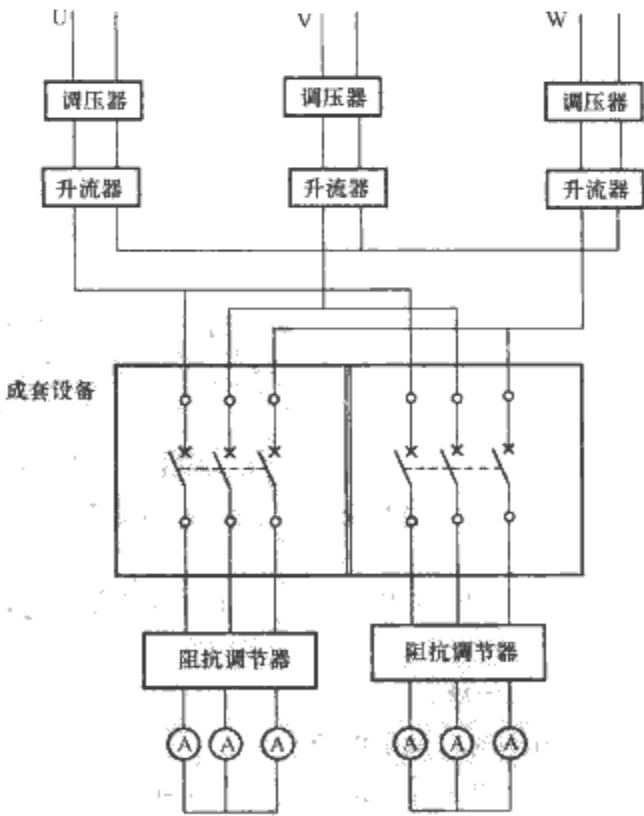


图 6.2-2 三相温升试验线路示意图

2.3.8 用功率损耗等效的加热电阻器进行温升试验

对于某些主电路额定电流比较小的封闭式成套设备,其

功率损耗可使用能产生相同热量的加热电阻器来模拟，该电阻器安装在外壳内适当的位置上。

连到电阻器上的引线截面不应导致显著的热量传出外壳。

加热电阻器试验，对外壳相同的所有成套设备应具有充分的代表性，尽管外壳内装有不同的电器元件，但只要考虑分散系数后，其内装元件的总功率损耗不超过试验中施加的功率损耗值即可。

内装的电器元件的温升不得超过表 6.2-4 规定的数值。该温升可按如下方法求得近似值：即先测量出该电器元件在大气中的温升，然后再加上外壳内部与外部的温差。

2.3.9 温度的测量

可用热电偶或温度计来测量温度。对于线圈，通常采用测量电阻变化值的方法来测量温度。为测量成套设备内部的空气温度，应在适宜的地方装配几个测量器件。

应防止空气流动和热辐射对温度计和热电偶的影响。

2.3.10 环境温度的测量

环境温度应在试验周期的最后 1/4 的时间内测量，测量时至少用两支温度计或热电偶，均匀地布置在设备的周围，在高度约等于成套设备的 1/2，并距离成套设备 1m 远的地方安装。应防止空气流动和热辐射对温度计和热电偶的影响。

2.3.11 温升限值

表 6.2-4 给出了温升限值，在平均环境温度不高于 35℃ 且按照上述进行验证时，不应超过表中限值。

2.4 试验结果判定

试验结束时，各部位的温升应不超过表 6.2-4 规定限值为合格。

表 6.2-4 成套设备温升限值	
成套设备的部件	温 升 (K)
内装元件①	根据不同元件的有关要求，或根据制造厂的说明书（如有的话），考虑成套设备内的温度
用于连接外部绝缘导线的端子	70②
母线和导体，连接到母线上的可移式部件和抽出式部件插接式触点	受下述条件限制： (1) 导电材料的机械强度 (2) 对相邻设备的可能影响 (3) 与导体接触的绝缘材料的允许温度极限 (4) 导体温度对与其相连的电器元件的影响 (5) 对于接插式触点，接插材料的性质和表面的加工处理
操作手柄	金属的 15③
	绝缘材料的 25③
可接近的外壳和覆板	金属表面 30④
	绝缘表面 40④
分散排列的插头与插座	由组成设备的元器件的温升极限而定⑤

① “内装元件”是指：常用的开关设备和控制设备，电子部件（例如整流桥、印制电路），设备的部件（例如调节器、稳压电源、运算放大器）。
② 温升极限为 70K 是根据 GB 7251.1 第 8.2.1 的常规试验而定的数值。在安装条件下使用或试验的成套设备，由于接线，端子类型、种类、布置与试验（常规）所用的不尽相同，因此端子的温升会不同，这是允许的。如果内装元件的端子同时也是外部绝缘导线的端子，则适用较低的温升极限值。
③ 对只有在成套设备打开后才能接触到的操作手柄，例如：事故操作手柄、抽出式手柄等，由于不经常操作，故允许有较高的温升。
④ 除非另有规定，否则可以接触但在正常工作情况下不需触及的外壳和覆板，允许其温升提高 10K。
⑤ 就某些设备（如电子器件）而言，它们的温升限值不同于那些通常的开关设备和控制设备，因此有一定程度的伸缩性。

3 介电性能试验

3.1 试验设备

(1) 工频耐压测试仪：应具有足够的功率以维持试验电压，可以不考虑漏电流。此试验电压应为正弦波，频率在 45~62Hz 之间。

(2) 雷电冲击试验装置：可以产生 1.2/50μs 正负极性的冲击电压。

3.2 正常使用环境条件

3.2.1 周围空气温度

(1) 户内成套设备的周围空气温度：上限为 +40℃，而且在 24h 内其平均温度不超过 +35℃；下限为 -5℃。

(2) 户外成套设备的周围空气温度：上限为 +40℃，而且在 24h 内其平均温度不超过 +35℃；下限在温带地区为 -25℃；严寒地区为 -50℃。

注：如在严寒地区使用成套设备，制造商与用户之间需要达成一个专门的协议。

3.2.2 大气条件

(1) 户内成套设备的大气条件：空气清洁，在最高温度为 +40℃ 时，其相对湿度不得超过 50%。在较低温度时，允许有较大的相对湿度。例如：+20℃ 时相对湿度可为 90%。但应考虑到由于温度的变化，有可能会偶尔产生适度的凝露。

(2) 户外成套设备的大气条件：最高温度为 +25℃ 时，相对湿度短时可高达 100%。

(3) 污染等级①：指成套设备所处的环境条件，是根据导电的或吸湿的尘埃，游离气体或盐类和由于吸湿或凝露导致表面介电强度或电阻率下降事件发生的频度而对环境条件作出的分级。

对外壳内的开关器件或元件，可使用外壳内环境条件的污染等级。

为了确定电气间隙和爬电距离，确立了以下 4 个微观环境的污染等级（在表 6.2-13 和表 6.2-14 中给出了按照不同的污染等级规定的电气间隙和爬电距离）：

污染等级 1：无污染，或仅有干燥的非导电性污染。

污染等级 2：一般情况下，只有非导电性污染。但是，也应考虑到偶然由于凝露造成的暂时的导电性。

污染等级 3：存在导电性污染，或者由于凝露使干燥的非导电性污染变成导电性的污染。

污染等级 4：造成持久性的导电性污染。例如由于导电尘埃或雨雪造成的污染。

如果没有其他规定，工业用途的成套设备通常在污染等级 3 环境中使用。而其他污染等级可以根据特殊用途或微观环境②考虑采用。

3.2.3 海拔

安装场地的海拔不得超过 2000m。

对于在海拔高于 1000m 处使用的电子设备，应考虑介电强度的降低和空气冷却效果的减弱。

① 设备或元件的绝缘材料所处的污染等级是与设备或元件所处的宏观环境的污染等级不同的，因为由外壳或内部加热提供了防止吸湿和凝露的保护。本章中的污染等级系指微观环境中的污染等级。 [IEC 60947-1 的 2.5.59]

② 设备的微观环境污染等级可能受外壳内安装结构的影响。

3.3 试验方法及要求

3.3.1 型式试验

对于成套设备的某些部件，已经按照有关规定进行过型式试验，而且在安装时没有损坏其介电强度，则不需单独对其进行型式试验。

当成套设备包含一个与裸露导电部件绝缘的保护导体时，该导体应被视为一个独立的电路，也就是说，应采用与其所在主电路相同的电压进行试验。

进行试验时：如果制造厂已标明额定冲击耐受电压 U_{imp} 的值，做冲击耐受电压试验；其他情况做工频耐受电压试验。

(1) 工频耐受电压试验：

1) 试验前准备。试验时成套设备应断开电源后进行。成套设备应形成一个闭合的电路，主电路的开关和控制设备应闭合或旁路。对半导体器件和不能承受规定电压的元件，应将其断开或旁路。对于安装在带电部件和裸露导电部件之间的抗扰性电容器不应断开，可以采用交流电压或等于规定的交流电压的峰值的直流电压进行试验。

2) 试验电压施加在以下部位：①成套设备的所有带电部件与相互连接的裸露导电部件之间；②在每个极和为此试验被连接到成套设备相互连接裸露导电部件上的所有其他极之间；③辅助电路与框架之间；④带电部件和用金属箔裹缠的绝缘操作手柄之间；⑤带电部件和用金属箔包裹的绝缘材料制造的外壳之间。

交流或直流试验电压有效值不应超过规定值 $\pm 5\%$ 。开始施加时的试验电压不应超过规定值的 50% 。然后在几秒钟之内将试验电压平稳增加至规定的最大值并保持 $5s$ 。

3) 绝缘外壳的试验。用绝缘材料制造的外壳，还应进行一次补充的介电试验。在外壳的外面包覆一层能覆盖所有开孔和接缝的金属箔，试验电压施加于这层金属箔和外壳内靠近开孔和接缝的相互连接的带电部件以及裸露导电部件之间。对于这种补充试验，其试验电压应等于表 6.2-5 中规定数值的 1.5 倍。

4) 用绝缘材料制造的外部操作手柄。用绝缘材料制造或覆盖的手柄，介电试验是在带电部件和用金属箔裹缠整个表面的手柄之间施加表 6.2-5 规定的 1.5 倍试验电压值。进行该试验时，框架不应接地，也不能同其他电路相连接。

5) 试验电压值：主电路及由主电路直接供电的辅助电路，按表 6.2-5 规定；不由主电路直接供电的辅助电路，按表 6.2-6 的规定。

表 6.2-5 试 验 电 压 值

额定绝缘电压 U_i (线—线) (V)	介电试验电压 (交流方均根值) (V)
$U_i \leq 60$	1000
$60 < U_i \leq 300$	2000
$300 < U_i \leq 690$	2500
$690 < U_i \leq 800$	3000
$800 < U_i \leq 1000$	3500
$1000 < U_i \leq 1500^{①}$	3500

① 仅指直流。

表 6.2-6 不由主电路直接供电的
 辅助电路试验电压值

额定绝缘电压 U_i (线—线) (V)	介电试验电压 (交流方均根值) (V)
$U_i \leq 12$	250
$12 < U_i \leq 60$	500
$60 < U_i$	$2U_i + 1000$ ，其最小值为 1500

6) 试验结果：如果没有电击穿或闪络现象，则此项试验可认为通过。

(2) 冲击耐受电压试验，是以全波形式模拟电力系统中所出现的大气过电压，在绝缘没发生闪络现象时，通常是具有全波形式的非周期的冲击波。冲击耐受电压试验规定了 $1.2/50\mu s$ 冲击电压波形，如图 6.2-3 所示。图中： T_1 称为脉冲前沿，指电压从 0 上升至 100% 峰值的时间； T_2 为从 0 至幅值下降到 50% 峰值的时间。 $T_1 = 1.2\mu s$ ，允许误差 $\pm 30\%$ ； $T_2 = 50\mu s$ ，允许误差 $\pm 20\%$ ；脉冲峰值 U_m 的允许误差为 $\pm 3\%$ 。

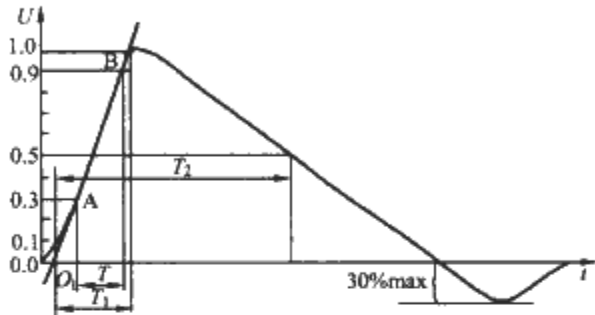


图 6.2-3 $1.2/50\mu s$ 冲击电压波形

1) 基本条件：被试的成套设备应按照生产厂的说明同正常使用时一样完整地安装在它自身的支撑件上或等效的支撑件上。环境条件按 3.2 规定。

任何用绝缘材料制成的操动机构和任何无附加外壳的设备的完整的非金属外壳应用金属箔覆盖，金属箔连接到框架或安装金属板上。该金属箔应将可以触及的所有表面全部盖住。

2) 试验电压：

a. 主电路的冲击耐受电压：

a) 带电部件与接地部件之间，极与极之间的电气间隙应能承受表 6.2-7 给出的对应于额定冲击耐受电压的试验电压值。

b) 对于处在隔离位置的抽出式部件，断开的触点之间的电气间隙应能承受表 6.2-8 给出的与额定冲击耐受电压相适应的试验电压值。

c) 与 a) 及 b) 项的电气间隙有关的成套设备的固态绝缘应能承受 a) 和 b) 项规定的冲击电压。

b. 辅助电路的冲击耐受电压：

a) 以主电路的额定工作电压（没有任何减少过电压的措施）直接操作的辅助电路应符合主电路冲击耐受电压中 a) 和 c) 项的要求。

b) 不由主电路直接操作的辅助电路，可以有与主电路不同的过电压承受能力。这类交流或直流电路的电气间隙和相关的固态绝缘应该承受表 6.2-15 中给出的相应电压值。

按照制造厂的协议，可用表 6.2-7 中给出的工频电压或直流电压进行试验。如果了解浪涌抑制器的性能，在该项试验时允许断开浪涌抑制器。但最好用冲击电压对带有过电压抑制装置的设备进行试验。试验电流的能量不应超过过电压抑制装置的额定能量。

3) 试验电压应施加在以下部位：①成套设备的每个带电部件（包括连接在主电路上的控制电路和辅助电路）和内连的裸露导电部件之间；②主电路每个极和其他极之间；③没有直接连接到主电路上的辅助电路与主电路、其他电路、裸露导电部件、外壳或安装板之间；④对于断开位置上的抽出式部件，穿过绝缘间隙，在电源侧和抽出式部件之间，以及在电源端和负载端之间。

表 6.2-7 冲击、工频和直流试验的介电耐受电压

额定冲击耐 受电压 U_{imp} (kV)	试验电压和相应的海拔									
	交流峰值和直流耐受电压 $U_{1.2/50}$ (kV)					交流方均根值 (kV)				
	海平面	200m	500m	1000m	2000m	海平面	200m	500m	1000m	2000m
0.33	0.36	0.36	0.35	0.34	0.33	0.25	0.25	0.25	0.25	0.23
0.5	0.54	0.54	0.53	0.52	0.5	0.38	0.38	0.38	0.37	0.36
0.8	0.95	0.9	0.9	0.85	0.8	0.67	0.64	0.64	0.60	0.57
1.5	1.8	1.7	1.7	1.6	1.5	1.3	1.2	1.2	1.1	1.06
2.5	2.9	2.8	2.8	2.7	2.5	2.1	2.0	2.0	1.9	1.77
4	4.9	4.8	4.7	4.4	4	3.5	3.4	3.3	3.1	2.83
6	7.4	7.2	7	6.7	6	5.3	5.1	5.0	4.75	4.24
8	9.8	9.6	9.3	9	8	7.0	6.8	6.6	6.4	5.66
12	14.8	14.5	14	13.3	12	10.5	10.3	10.0	9.5	8.48

注 1. 本表采用了表 6.2-13 均匀电场、情况 B 的特性，因此冲击电压、直流和交流值耐受电压值是相同的。其交流方均根值是从交流峰值推导出来的。

2. 如果电气间隙介于表 6.2-13 中情况 A 和情况 B 之间，那么本表给出的交流值和直流值比冲击电压值更严格。

3. 工频电压试验要遵循制造厂的协议（见 GB 7251.1 中 8.2.2.6.2）。

表 6.2-8 适用于设备断开点之间隔离距离的试验电压

额定冲击耐 受电压 U_{imp} (kV)	试验电压和相应的海拔									
	$U_{1.2/50}$ 、交流峰值和直流 (kV)					交流方均根值 (kV)				
	海平面	200m	500m	1000m	2000m	海平面	200m	500m	1000m	2000m
0.33	1.8	1.7	1.7	1.6	1.5	1.3	1.2	1.2	1.1	1.06
0.5	1.8	1.7	1.7	1.6	1.5	1.3	1.2	1.2	1.1	1.06
0.8	1.8	1.7	1.7	1.6	1.5	1.3	1.2	1.2	1.1	1.06
1.5	2.3	2.3	2.2	2.2	2	1.6	1.6	1.55	1.55	1.42
2.5	3.5	3.5	3.4	3.2	3	2.47	2.47	2.4	2.26	2.12
4	6.2	6	5.8	5.6	5	4.38	4.24	4.10	3.96	3.54
6	9.8	9.6	9.3	9	8	7.0	6.8	6.60	6.40	5.66
8	12.3	12.1	11.7	11.1	10	8.7	8.55	8.27	7.85	7.07
12	18.5	18.1	17.5	16.7	15	13.1	12.80	12.37	11.80	10.6

注 1. 如果电气间隙介于 6.2-13 中情况 A 和情况 B 之间，本表给出的交流值和直流值比冲击电压值更严格。

2. 工频电压试验以制造商的协议为条件。

4) 施加试验电压：①对每个极应施加 3 次 1.2/50 μ s 的冲击电压，间隔时间至少为 1s；②施加工频电压和直流电压，在交流情况下，持续时间 3 个工频周期；在直流情况下，每极施加 10ms。

5) 试验结果判定：在试验过程中，无击穿放电为合格。

3.3.2 出厂试验

如果制造商已标出额定冲击耐受电压 U_{imp} 的值，则按照下述 (1) 和 (2) 中的 2) 项进行试验。其他情况则按照 (1) 和 (2) 中 1) 项进行试验。

对于已按本章 3.3.1 或 10 的规定验证绝缘电阻的 PT-TA，则不需进行此项试验。

(1) 出厂试验总则。试验时，成套设备的所有电气器件都应连接起来，除非根据有关规定应施加较低试验电压的器件以及某些消耗电流的器件（如线圈、测量仪器），对这些电器施加试验电压后将会引起电流的流动，则应当断开。此类电器应在其中一个接线端上断开，除非它被设计为不能耐受满载试验电压时，才能将接线端子都断开。

安装在带电部件和裸露导电部件之间的抗干扰电容器不应断开，此电容器应能够耐受试验电压。

(2) 试验电压值、持续时间和实施：

1) 按照 3.3.1 中 (1) 2) 中①、②试验电压施加时间为 1s。交流电源应该有足够的容量，以便在出现各种漏电

流时仍能维持试验电压，试验电压为正弦波，其频率在 45~62Hz 之间。

如果被试设备包括在已预先经受过介电试验的主电路或辅助电路之中，试验电压则可以减至表 6.2-5 和表 6.2-6 所给出值的 85%。

试验时应闭合所有的开关器件，或将试验电压依次施加在电路的所有部件上。

试验电压应施加在带电部件和成套设备的导电框架之间。

2) 如果安装在电路中的元件按照其相关标准用较低的试验电压进行了出厂试验，那么，此试验也应采用上述较低的电压值。然而，此试验电压不应低于额定冲击耐受电压 30%（不用海拔修正因数）或不低于 2 倍的额定绝缘电压，且采用这两者中较高的一种。

(3) 试验结果判定：无电击穿和闪络现象为合格。

4 短路耐受强度试验

4.1 适用范围及依据

主要用于交流低压成套开关设备和控制设备的短路耐受强度试验，依据 GB 7251.1。

4.2 名词定义

4.2.1 额定短时耐受电流 (I_{cw}) (成套设备中一条电路的)

成套设备中一条电路的额定短时耐受电流是指由制造商给出的, 该电路在规定的试验条件下能安全承载的短时耐受电流方均根值。电流持续时间为 1s。

如果制造厂规定时间小于 1s, 则应规定额定短时耐受电流及时间, 例如 20kA, 0.2s。

4.2.2 额定峰值耐受电流 (I_{pk}) (成套设备中一条电路的)

成套设备中一条电路的额定峰值耐受电流是指在规定的试验条件下, 制造商规定此电路能够圆满地承受的峰值电流。

4.2.3 额定限制短路电流 (I_{sc}) (成套设备中一条电路的)

成套设备中一条电路的额定限制短路电流是指在规定的试验条件下, 用制造商规定的短路保护器件进行保护的电路在保护装置动作的时间内能够承受的预期短路电流值。

短路保护器件的详细规定应由制造商给出。短路保护器件既可以作为成套设备的组成部分, 也可以作为独立的单元。

对于交流而言, 额定限制短路电流是交流分量的方均根值。

4.2.4 额定熔断短路电流 (I_{ef}) (成套设备中一条电路的)

成套设备中一条电路的额定熔断短路电流是指当短路保护器件为熔断器时, 此电路的额定限制短路电流。

4.2.5 耐受电流峰值与短路耐受电流之间的关系

为确定电动力的强度, 耐受电流的峰值应用短路耐受电流乘系数 n 获得。系数 n 的标准值和相应的功率因数见表 6.2-9。

表 6.2-9 系数 n 的标准值及相应的功率因数		
短路电流的方均根值 (kA)	$\cos\varphi$	n
$I \leq 5$	0.7	1.5
$5 < I \leq 10$	0.5	1.7
$10 < I \leq 20$	0.3	2
$20 < I \leq 50$	0.25	2.1
$50 < I$	0.2	2.2

注 表中的值适合于大多数用途。在某些特殊的场合, 例如在变压器或发电机附近, 功率因数可能更低。因此, 最大的预期峰值电流就可能变为极限值以代替短路电流的方均根值。

4.3 试验总则

成套设备及其部件应像正常使用时一样安置。除了在母线上的试验和取决于成套设备结构形式的试验以外, 如果各功能单元结构相同, 而且不影响试验结果, 就只需试验一个功能单元。

如果试验电路中包含有熔断器, 应采用最大电流额定值 (对应于额定电流) 的熔芯。如果需要, 应使用制造商规定的熔断器。

成套设备试验时所使用的电源线和短路连接导线应有足够的强度以耐受短路, 它们的排列不应造成任何附加的应力。

如果没有其他规定, 试验电源应接到成套设备的输入端上, 三相成套设备应按三相连接。

对于所有短路耐受额定值的验证在电源电压为 1.05 倍额定工作电压时, 预期短路电流值可由示波器来显示, 见图

6.2-4 三相预期波, 该波形图的数据是由成套设备供电的导体上取得, 数据采集点位置尽可能靠近成套设备的输入电源侧, 并将成套设备用可忽略阻抗的导体进行短路。示波图应显示出一个稳定电流, 该电流可在某一时间内测得 (即该时间等于成套设备内保护器件的动作时间) 或在一规定时间内测得, 该电流值近似于 4.4.2 中规定的值。

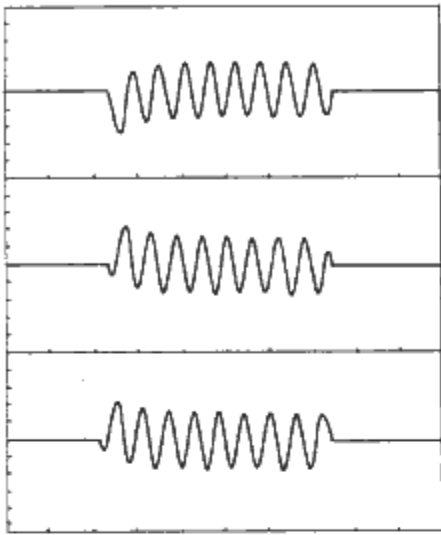


图 6.2-4 三相预期波

用交流进行短路试验时, 试验电路的频率允许偏差为额定频率的 25%。

在操作中与保护导体连接的设备的所有部件, 包括外壳, 应进行如下连接:

(1) 对于适用于三相四线系统中带一个接地中性点, 并带有相应标志的成套设备, 可接在电源中性点上或接在带电感的人为中性点上, 应该允许的预期故障电流至少为 1500A。

(2) 对于也适用于三相三线系统并带有相应标志的成套设备, 同三相四线系统的连接方式一样, 并且, 要与产生对地电弧的可能性很小的相导体连接。

设备除按 GB 7251.1 中 7.4.3.2.2 要求的用完全绝缘进行防护外, 试验电路中应连接一个安全装置 (如一个由直径为 0.8mm、长度不超过 50mm 的铜丝作熔芯的熔断器)。一根 0.8mm 直径的铜丝, 如通过 1500A 频率在 45~67Hz 之间的电流, 大约经过半个周期就熔断 (对于直流, 熔断时间为 0.01s), 因此, 可用以检测故障电流。在这种可熔元件的电路中, 预期故障电流应为 1500A±150A; 必要时, 可用一个电阻器把电流限制在该值上。

对于小型设备, 预期故障电流可能小于 1500A, 可选用熔断时间与上面所述相同, 直径较小的铜丝, 见表 6.2-10。

表 6.2-10 预期故障电流与铜丝直径的关系	
铜丝直径 (mm)	可熔元件电路中预期故障电流 (A)
0.1	50
0.2	150
0.3	300
0.4	500
0.5	800
0.8	1500

电源具有一个人工的中性点时, 预期故障电流可能比较低, 按照制造商的协议, 可选用熔断时间与上面所述相同的直径较小的铜丝。

4.4 主电路试验

4.4.1 试验安排

对于带母排的成套设备, 按照下面 (1)、(2) 和 (4)

项进行试验。

对于不带母排的成套设备,按照下面(1)项进行试验。

对于不满足 GB 7251.1 中 7.5.5.1.2 [即:在框架单元内部,主母线和功能单元电源侧及包括在该单元内的电器元件之间的连接导体(包括配电母线),应根据每个单元内相关短路电器负载侧的衰减后的短路应力来确定]要求的成套设备,另外还要按照(4)项进行试验。

当试验站没有能力用最大工作电压进行短时耐受试验或峰值耐受试验时,根据下面的(2)、(3)、(4)项进行的试验可在低电压下进行。在这种情况下,实际试验电流等于额定短时耐受电流或峰值耐受电流。这些应在试验报告中说明。然而,在试验期间,如果出现保护装置发生瞬时触点分离,则应用最大工作电压重新进行试验。

(1) 如果电路中有一个没经过试验的元件,则应进行如下试验:

1) 将其出线端子进行短路连接。当电路中的保护器件是一个断路器时,根据 IEC 60947-1 中 8.3.4.1.2 的 b),试验电路可包括一个分流电阻器与电抗器并联来调整短路电流。

2) 对于额定电流不大于 630A 的断路器,在试验电路中,用一根长 0.75m、截面积相应于约定发热电流的电缆。断路器应合闸,并像工作中正常使用那样在合闸位置上。然后施加 1.05 倍额定工作电压,并维持足够长的时间,使出线单元的短路保护器件动作以消除故障,在任何情况下,试验电压持续时间不得少于 10 个工频周期,见图 6.2-5 通断试验波形。

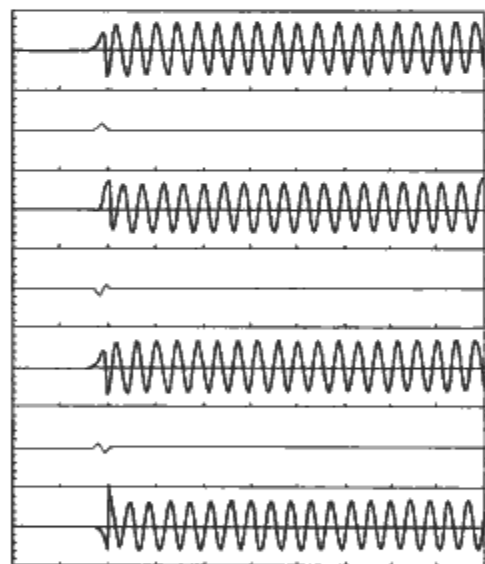


图 6.2-5 通断试验波形

(2) 带有主母排的成套设备应进行短路耐受强度试验,以考验主母排和进线电路包括连接点的短路耐受强度。短路点离电源的最近点应是 $2m \pm 0.40m$ 。对于额定短时耐受电流和额定峰值耐受电流验证,如果在低压下进行试验时,此距离可以增大。成套设备的试验母排长度应小于 1.6m,并且应对整条母排进行试验,短路点应在这些母排的末端。如果一组母排由不同的母排段构成(例如截面积不同,相邻母排之间的距离不同,母排形式及每米母排上支架的数量不同),则每一段母排应分别或同时进行试验,该试验亦应满足上面所提的条件。

(3) 在将母排接到单独的出线单元的导体中,用螺栓连接实现短路时,短路点应尽量靠近出线单元母排侧的端子。短路电流值应与主母排相同。

(4) 如果存在中性母排,应进行一次试验以考验其相对于最近的母排(包括任何连接点)的短路耐受强度。上面

(2) 项的要求适用于中性母排与该相母排的连接。制造商与用户之间如无其他协议,中性母排试验的电流值应为三相试验时相电流的 60%。

4.4.2 短路电流值及其持续时间

(1) 用短路保护器件保护的成套设备,无论保护器件是在进线单元或是其他地方,试验电压的施加时间应足够长,在任何情况下,不应少于 10 个工频周期,以确保短路保护器件动作,并清除故障。

(2) 进线单元中不带有短路保护器的成套设备,应在指定保护器件的电源侧,用预期电流对于所有短路耐受额定值进行动应力和热应力验证,见图 6.2-6 三相动热稳定试验波形。如果制造商给出了额定短时耐受电流、额定峰值耐受电流、额定限制短路电流或额定熔断短路电流的数值,则该预期电流应与制造商给出的值相等。

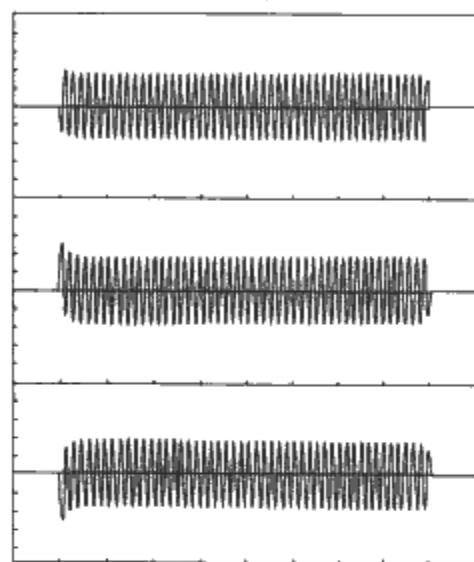


图 6.2-6 三相动热稳定试验波形

在短时和峰值耐受试验时,如果有任何过载脱扣装置在试验时发生脱扣动作,则试验无效。

所有的试验应在设备的额定频率(偏差 $\pm 25\%$)及按表 6.2-9 的短路电流对应的功率因数下进行。

标定电流值应是所有相中交流分量的平均有效值。当以最大工作电压进行试验时,标定电流即是实际试验电流。在每相中电流偏差在 $+5\% \sim 0$ 之间,而且功率因数偏差在 $+0.0 \sim 0.05$ 之间。在施加电流的规定时间内,其交流分量的有效值应保持不变。

如果受到试验条件的限制,也允许采用不同的试验周期,在此情况下,试验电流建议根据公式 $I^2t = \text{常数}$ 进行修正;但如无制造商的同意,峰值不得超过额定峰值耐受电流,而且短时耐受电流有效值至少有一相在电流起始后的 0.1s 不得小于额定值。

短时耐受电流和峰值耐受电流试验允许分别进行。在此情况下,峰值耐受电流试验时施加短路电流的时间,通常 I^2t 值不大于短时耐受电流试验的相应值,但它不得小于 3 个工频周期。

对于限制和熔断短路电流试验,在规定保护器件的电源侧,试验应以 1.05 倍额定工作电压及预期电流进行,预期电流值等于额定限制或熔断短路电流值。试验不允许以低电压进行。

4.4.3 试验结果判定

试验后,导线不应有任何过大的变形,只要电气间隙和爬电距离仍符合规定(母排的微小变形是允许的);同时,导线的绝缘和绝缘支撑部件不应有任何明显的损伤痕迹(绝缘物的主要性能仍保证设备的机械性能和电气性能满足本标准的要求)为合格。

检测器件不应指示出有故障电流发生。

导线的连接部件不应松动,而且,导线不应从输出端子上脱落。

在不影响防护等级,电气间隙不减小到小于规定数值的条件下,外壳的变形是允许的。

母排电路或成套设备框架的任何变形影响了抽出式部件或可移式部件的正常插入的情况,应视为故障。

在有疑问的情况下,应检查成套设备的内装元件的状况是否符合有关规定。

另外,在成套设备中如果出线电路中有一个事先没经过试验的元件和包含短路器件的试验之后,被试设备应能承受 GB 7251.1 中 8.2.2 的介电试验。该试验的电压值在相关标准中有关短路试验内容中有规定。试验在如下部位进行:

(1) 在所有带电部件与成套设备的框架之间。

(2) 在每一极和与成套设备的框架连接的所有其他极之间。

4.5 保护电路的短路强度试验

4.5.1 试验安排

一个单相试验电源,一极连接在一相的进线端子上,另一极连接到进线保护导体的端子上。如成套设备带有单独的保护导体,应使用最近的相导体。对于每个有代表性的出线单元应进行单独试验,即用螺栓在单元的对应相的出线端子和相关的出线保护导体之间进行短路连接。

试验中的每个出线单元应配有保护装置,该保护装置可使单元通过最大峰值电流和 I^2t 值。此试验允许用成套设备外部的保护器件来进行。

对于此试验,成套设备的框架应与地绝缘。试验电压应等于额定工作电压的单相值。所用预期短路电流值应是成套设备三相短路耐受试验的预期短路电流值的 60%。

其他试验方法及要求见本章 4.4。

4.5.2 试验结果判定

无论是由单独导体或是由框架组成的保护电路,其连续性和短路耐受强度都不应遭受严重破坏为合格。

除直观检查外,还可用通以相关出线单元额定电流的方法进行测量,以验证上述结果。

当把框架作为保护导体使用时,只要不影响电的连续性,而且邻近的易燃部件不会燃烧,则接合处出现的火花和局部发热是允许的。

试验前后,在进线保护导体端子和相关的出线保护导体端子间测量电阻比值可验证是否符合这一条件。

4.6 短路试验设备

4.6.1 短路试验主电路系统设备

短路试验主电路系统的设备配置见图 6.2-7。

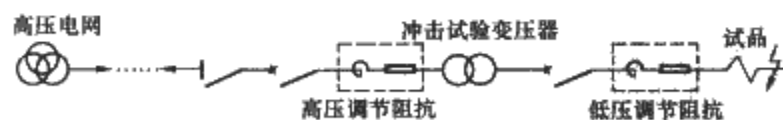


图 6.2-7 短路试验系统简图

短路试验主电路系统主要是由高、低压隔离器、断路器、冲击试验变压器、高低压调节阻抗组成。

冲击试验变压器是短路试验的主要设备,为试验电源变压器。试验变压器的选择十分重要,选用的试验变压器都要求能使用于反复的冲击电流试验,除了能承受强大的反复电动力外,为了获得最大的试验电流,还要求变压器自身的阻

抗很小。目前常用的冲击试验变压器,其低压侧每相有 4 个绕组,每个绕组为 210V,各绕组的首尾端均引至油箱盖上,可换接成 230V,400V,690V,1200V 及其他电压,并考虑主要试验电压为 Y 连接,以便有 N 线电压的输出;高压侧有 0, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 15\%$, $\pm 20\%$, $\pm 25\%$ 的分接开关。

为了获得大的冲击电流,短路试验系统的阻抗应尽可能低;为了降低其低压回路阻抗,通常试验参数的调节阻抗放置在高压侧;冲击试验变压器电压转换用的 Δ/Y 及 4 个绕组的串并联装置均用低电感的结构形式;低压主回路采用低电感大电流母线结构;低压侧可做成两个大容量试验回路,其中一个回路中没有低压断路器,分合电路全用高压断路器进行,另一个回路在电流小于 30kA 时,可用低压断路器做合闸开关;高压断路器用两台串联,一台作为保护断路器,另一台作为操作断路器,用于分合空载变压器等。

4.6.2 测量和数据处理系统

(1) 测量和数据处理系统的基本要求:

1) 可靠性高。由于该类试验为不可重复试验,试验电流又有大有小,大电流可达几十万安培,小电流只有几千安培,大小信号时都必须正常动作,故可靠性要求高。

2) 抗电磁干扰能力强。短路试验室内电流很大,电磁场强且很复杂,干扰不但影响系统的可靠工作,而且直接影响测量的准确性,故抗电磁干扰能力必须强。

3) 先进的数据采集和处理软件。应有良好的界面,很强的自动运算、图形记录、文件管理(包括有关数据库及试验报告的处理)、通信功能等。

(2) CY2000 系列低压电器试验数据采集及处理系统(简称 CY2000 数据采集处理系统)。目前国内大多数低压短路试验系统选用 CY2000 数据采集处理系统(含软、硬件)。该系统是低压通断试验、短路强度试验专用数据采集处理系统。系统由以下几部分组成:

1) 专用软件。CY2000 数据采集处理系统配有功能强大的专用软件,含有低压短路强度试验的标准化设置,试验程序软件是在全汉化的 WINDOWS 界面开发的,在 WINDOWS 环境下运行直观方便,界面友好,它不仅适合于常规短路强度试验,而且适合于科研及新试验方法及试验回路开发。CY2000 系列软件本身是一个全开放系统,允许用户做硬件参数设定,从采集控制中的采集速度,记录长度,触发方式,触发通道到显示方式是通用型软件,做好一个设置存储起来,以后任何时候只要调出该文件,就可按照原来的设置自动完成所规定的工作。

2) 多通道隔离放大器。多通道隔离放大器不仅可以保护测试设备及人身安全,而且可提高抗干扰能力,减少通道之间的影响,保证了测试的准确性。因采集卡在正常工作时输入电压为 $\pm 5V$,但当输入口有高至 2kV 的共模过电压时,该隔离装置可保证其主体采集卡及处理用计算机不致损坏。各项参数性能指标符合一般工频信号的测试要求,隔离装置不仅使该采集器有了高至 2kV 的抗共模能力,而且解决了各通道测试信号的共地而引起的一系列问题,实现了被测信号之间的独立性,使数据采集系统工作稳定可靠。

3) 数据采集系统。CY2000 数据采集处理系统是低压短路强度试验专用数据采集处理系统,用于通断试验、短路强度试验及熔断器等试验的工频信号数据采集处理,共有 8 个通道,是专门按国内目前各低压试验站的实际情况而设计的。

a. CY2000 型数据采集技术参数:

通道数: 8个。

分辨率: 12bit。

最高采样速度: 25 000 采样点/s, 各通道并行采样。

触发脉冲宽度调节范围: 2 ~ 254 个采样点。

最大采集容量: 128KB, 每通道 64KB。

输入信号电压: $\pm 5V$ 。

线性度: 0.5%。

b. 数据采集主要特点:

a) 具有多种触发功能。利用输入信号进行触发, 输入通道上一旦有信号出现, 则采集装置会自动触发, 完成记录采集功能, 省掉了外触发信号, 不存在触发信号与被测信号之间的同步问题。同时内触发脉冲宽度可以程控调节, 避免了由于干扰尖脉冲而引起的误触发现象。

b) 记录采集速度可程控设定。CY2000 型数据采集装置的采样速度从 1000 点/s 到 25 000 点/s 可程控设定, 其最高采样速度与所使用的通道数无关。

c) 记录容量大, 波形的记录时间由采样速度和每通道记录容量决定, 其间的关系为: 波形记录时间 = 每通道记录容量 / 采样速度。

d) 波形记录及传输速度。该采集装置中所用的元件为数字电路器件, 采集记录速度很快。另外, 该采集装置的主体数据采集板直接插在计算机的插槽内, 其数据可直接利用计算机的 PC 总线进行传输, 传输速度也很快。

4.6.3 短路强度试验的自动化控制系统

短路强度试验的自动化控制系统采用高性能可编程控制器 (PLC) 和先进的上位监控计算机。由于采用高性能的 PLC, 系统具有很强的数据处理能力和大的程序存储能力, 对于完成复杂试验成为可能。通过人机接口选择试验工况, 并输入相关试验参数使试验自动进行, 监控计算机具有整个试验系统的监控功能、故障诊断功能。

上位监控系统与基础自动化级之间 PLC 采用 MPI 网连接。基础自动化级 PLC 和传动级之间采用 PROFIBUS DP 网连接, 增加了控制的灵活性。PROFIBUS DP 为开放式网络, 符合国际标准 EN50110, 传输速率最大 12Mbit/s, 采用双绞屏蔽线。基础自动化级 PLC 采用分布式 I/O 系统: 现场设备的保护信号连接到就近的远程终端上, 远程终端之间、远程终端和主控 PLC 之间用 PROFIBUS DP 网连接。这样, 减少了现场设备到控制室、操作箱等电气控制系统之间的信号连接电缆, 使控制台到主控 PLC 之间为通信电缆和电源线, 现场分布式 I/O 箱为局部的集线中心。充分利用网络, 节省总体成本, 提高了系统功能和可靠性。

5 防护措施和保护电路有效性检查

5.1 防护措施检查

应检查防止直接接触和间接接触的防护措施。

可利用直观检查来验证保护电路以确保 5.1.2 中 (1) 5) 所列措施得以实施。尤其应检查螺钉连接是否接触良好, 可能的话应抽样试验。

5.1.1 直接接触的防护

可利用成套设备本身适宜的结构措施, 也可利用在安装过程中采取的附加措施来获得对直接接触的防护。

(1) 带电部件的绝缘防护应做到: ①用绝缘材料将带电部件完全包住, 绝缘材料只有在被破坏后才能去掉; ②绝缘材料应采用能够承受使用中可能遇到的机械、电和热应力的材料制成。

例如: 把带电部件用绝缘材料包裹, 电缆即为一例。

通常单独使用的漆层、搪瓷或类似物品的绝缘强度不够, 不能作为正常使用时的触电防护材料。

(2) 利用挡板或外壳进行防护, 应遵守下述要求:

1) 所有外壳的直接接触防护等级至少应为 IP2X 或 IPXXB, 金属外壳与被保护的带电部件之间的距离不得小于本章常规试验 6 所规定的电气间隙和爬电距离, 如果外壳是绝缘材料制成的则例外。

2) 所有挡板和外壳均应安全地固定在其位置上。在考虑它们的特性、尺寸和排列的同时, 应使它们有足够的稳固性和耐久性, 以承受正常使用时可能出现的变形和应力, 而不减少本章常规试验 6 规定的电气间隙。

3) 在有必要移动挡板、打开外壳或拆卸外壳的部件 (门、护套、覆板和同类物) 时, 应满足下述条件之一:

a. 移动、打开或拆卸必需使用钥匙或工具。

b. 在打开门之前, 应使所有的带电部件断电, 因为打开门后有可能意外地触及这些带电部件。在 TN-C 系统中, PEN 导体不应分离或断开; TC-S 系统中, 中性导体不必分离或断开。

举例: 将隔离器与一个门或几个门同时联锁, 以使它们在隔离器断开时, 才能被打开, 而且在打开门的同时, 隔离器不可能再闭合, 除非解除联锁或使用工具。

如果由于操作原因给成套设备装配上一个器件, 此器件允许经过批准的人在设备带电时接近带电部件, 当门重新关闭时, 联锁应当自动地恢复。

c. 应给成套设备装设一个内部屏障或活动挡板用来遮挡所有的带电部件, 这样, 在门被打开时, 不会意外地触及带电部件。此屏障或活动挡板应符合 1), 例外见 d. 项和 2) 项。它们可以被固定在其位置上, 或者在打开门的一瞬间滑入其位置上。除非使用钥匙或工具, 否则屏障或活动挡板不可能取下。

一般均需加警告标志。

d. 对挡板后面或外壳内部的所有带电部件需要做临时处理时 (例如: 更换灯泡和熔芯), 仅在下列条件得到满足时, 方可在不用钥匙或工具, 同时也不断开开关的情况下移动、打开或拆卸挡板或外壳 (见 GB7251 中 7.6.4):

a) 在挡板后面或外壳内设置一屏障, 以便防止人员意外碰到不带其他保护设施的带电部件。但此屏障不必防止有关人员故意用手越过挡板去触及带电部件, 不用钥匙或工具不能移动这层屏障。

b) 如果带电部件的电压符合安全超低压的条件, 则不须进行防护。

(3) 利用屏障进行防护。此措施适用于开启式成套设备。

5.1.2 对间接接触的防护

用户应说明适合于成套设备安装的防护措施。尤其要注意对整个装置防止间接接触的要求, 例如采用保护导体。

(1) 利用保护电路进行防护。成套设备中的保护电路可由单独的保护导体或导电结构部件组成, 或由两者共同组成。它提供下述保护: ①防止成套设备内部故障引起的后果; ②防止由成套设备供电的外部电路的故障引起的后果。

下面给出了保护电路的要求:

1) 应在结构上采取措施, 以保证成套设备裸露导电部件之间以及这些部件和保护电路之间的电连续性。对于 PT-TA, 除非采用通过型式试验的安排, 或按本章 4 不需要进行短路强度的验证, 否则, 保护电路应使用单独的保护导

体,而且把它安置在母线电磁力的影响可以被忽略的位置。

2) 成套设备的裸露导电部件在下述情况下不会构成危险,则不需与保护电路连接:①不可能大面积接触或用手抓住;②或者由于裸露导电部件很小(大约 50mm×50mm),或者被固定在其位置上时,不可能与带电部件接触。

这适用于螺钉、铆钉和铭牌,也适用于接触器或继电器的衔铁、变压器的铁心(除非它们带有连接保护电路的端子)、脱扣器的某些部件等,不论其尺寸大小。

3) 手动操作装置(手柄、转轮等)应:①安全可靠地同已连接到保护电路上的部件进行电气连接;②带有辅助绝缘物,以将手动操作装置同成套设备的其他导电部件互相绝缘。此绝缘物至少应与手动操作装置所属器件的最大绝缘电压等级一样。

操作时通常用手握的手动操作的部件最好采用符合成套设备的最大绝缘电压的绝缘材料来制作或包覆。

4) 用漆层或搪瓷覆盖的金属部件一般认为没有足够的绝缘能力以满足这些要求。

5) 应通过直接的或由保护导体完成的相互有效连接来确保保护电路的连续性。

a. 当把成套设备的一个部件从外壳中取出时,如进行例行维修时,成套设备其余部分的保护电路不应当被切断。如果采用的措施能够保证保护电路有持久良好的导电能力,而且载流容量足以承受成套设备中流过的接地故障电流,则组装成套设备的各种金属部件可被认为能够有效地保证保护电路的连续性。

注意:软金属管不用作保护导体。

b. 如果可移式或抽出式部件配备有金属支撑表面,而且它们对支撑表面上施加压力足够大,则认为这些支撑面能充分保证保护电路的连续性,可能有必要采取一定的措施以保证有持久良好的导电性。

c. 在盖板、门、遮板和类似部件上面,如果没有安装电气设备,通常的金属螺钉连接和金属铰链连接被认为足以保证电的连续性。

如果在盖板、门、遮板等部件上装有电压值超过超低压限值的电器时,应采取措施,以保证保护电路的连续性。通常给这些部件装配上一个保护导体,此保护导体的截面积取决于所属电器电源引线截面积的最大值,并且符合表 6.2-11 的要求。为此目的而设计的等效的电连接方式(如滑动触点,防腐蚀铰链)也认为是满足要求的。

表 6.2-11 保护导体的截面积 (PE、PEN)

相导线的截面积 S (mm ²)	相应保护导体的最小截面积 S _p (PE、PEN) (mm ²)
S≤16	S
16<S≤35	16
35<S≤400	S/2
400<S≤800	200
800<S	S/4

d. 成套设备内保护电路所有部件的设计,应使它们能够承受在成套设备的安装场地可能遇到的最大热应力和动应力。

e. 如果将外壳当作保护电路的一部分使用时,其截面积与以下 i 项中规定的最小截面积在导电能力方面应是等效的。

f. 当利用连接器或插头插座切断保护电路连续性

时,只有在带电导体已被切断后,保护电路才能断开,并且,在带电导体重新接通以前,应先恢复保护电路的连续性。

g. 原则上,成套设备内的保护电路不应包含分断器件(开关、隔离器等),但 f 项中提及的情况例外。保护导体的整个回路中,唯一允许的措施是设置连接片,这种连接片只有经过批准的人才可借助于工具来拆卸(某些试验可能需要此种连接片)。

h. 用于连接外部保护导体的端子和电缆套的端子应是裸露的,如无其他规定,应适于连接铜导体。应该为每条电路的出线保护导体设置一个尺寸合适的单独端子。对铝或铝合金的外壳或导体,应特别注意电腐蚀的危险。在成套设备具有导电结构、外壳等部件的情况下,应采取措施以保证成套设备的裸露导电部件(保护电路)和连接电缆的金属外皮(钢管、铅皮等)之间的电的连续性。用于保证裸露导体与外部保护导体的电的连续性而采取的连接措施不得用作其他用途。

如果成套设备金属部件,尤其是密封盖,具有完善的耐磨表面,例如使用粉末涂料,宜采取专门的措施。

i. 外部导体所连接的成套设备内的保护导体(PE、PEN)的截面积应按下述方法中的一种来确定:

a) 保护导体(PE、PEN)的截面积不应小于表 6.2-11 中的规定值。如果表 6.2-11 用于 PEN 导体,在中性电流不超过相电流的 30%的前提下是允许的。

如果应用此表得出非标准尺寸,则应采用最接近的较大的标准截面积的保护导体(PE、PEN)。

只有在保护导体(PE、PEN)的材料与相导体的材料相同时,表 6.2-11 中的值才有效。如果材料不同,保护导体(PE、PEN)截面积的确定要使之达到与表 6.2-11 相同的导电效果。

对于 PEN 导体,下述补充要求应适用:①最小截面积应为铜 10mm² 或铝 16mm²;②在成套设备内 PEN 导体不需绝缘;③结构部件不应用作 PEN 导体,但铜制或铝制安装轨道可用作 PEN 导体;④在某些应用场合,例如大的荧光照明装置,PEN 导体的电流可能达到较高值,可以根据制造商与用户之间的专门协议,配备其载流量等于或高于相导体的 PEN 导体。

b) 保护导体的截面积还可用 GB 7251 附录 B 中规定的公式计算求得,或用其他方法获得。例如:通过试验获得。

确定保护导体的截面积,必须同时满足下述条件:①验证保护电路的短路强度时,故障电路阻抗值应满足保护器件动作时所要求的条件;②电力保护器件动作条件应这样选择:不能因保护导体(PE、PEN)中的故障电流所引起的温升损坏该导体或其电连续性。

j. 如果成套设备中带有导电材料构成的结构部件、框架、外壳等,保护导体则不需与这些部件绝缘(例外情况见下 k.)。

k. 接至某些保护电器的导体,包括连接这些器件至单独接地电极的导体,都必须细致地进行绝缘。这适用于诸如电压型故障检测器,同时也适用于变压器中性点的接地线。

注意:在实施关于这类器件的技术要求时,要注意采用专门的措施。

l. 某一器件,如其可接近导电部件不能用固装方式与保护电路连接,而应用导线连接到成套设备的保护电路上,

导线的截面积根据表 6.2-12 选择。

表 6.2-12 铜连接导线的截面积


额定工作电流 I_N (A)	连接导线的最小截面积 (mm ²)
$I_N \leq 20$	S ^①
$20 < I_N \leq 25$	2.5
$25 < I_N \leq 32$	4
$32 < I_N \leq 63$	6
$63 < I_N$	10

① S 为相导体的截面积 (mm²)。

(2) 采用保护电路以外的防护措施。成套设备可以提供下述不要求带有保护电路的防止间接接触的措施：①电路的电气隔离；②完全绝缘。

1) 电路的电气隔离：参见 IEC 60364-4-41：413.5。

2) 用完全绝缘进行防护。采用完全绝缘防止间接接触必须满足下述要求：

a. 电器元件应用绝缘材料完全封闭。外壳上应标有从外部易见的符号 。

b. 外壳采用绝缘材料制作，这种绝缘材料应能耐受在正常使用条件下或特殊使用条件下易于遭受的机械、电气和热应力，还应具有耐老化和阻燃能力。

c. 外壳上不应有因导电部件穿过而可能将故障电压引出壳体外的部位。也就是说，金属部件，例如由于结构上的原因必须引出外壳的操动机构的轴，在外壳的内部和外部应按最大的额定绝缘电压与带电部件绝缘，而且（如果适用）应按成套设备中所有电路的最大额定冲击耐受电压绝缘。

如果操动机构是用金属做的（不管是否用绝缘材料覆盖），应按最大额定绝缘电压提供额定的绝缘，而且（如果适用）应按成套设备中所有电路的最大额定冲击耐受电压提供绝缘。

如果操动机构主要是用绝缘材料做的，若它的任何金属部件在绝缘故障时变得易接触，也应按最大额定绝缘电压与带电部件绝缘，而且（如果适用）也应按成套设备中所有电路的最大额定冲击耐受电压绝缘。

d. 成套设备准备投入运行并接上电源时，外壳应将所有的带电部件、裸露导电部件和附属属于保护电路的部件封闭起来，以使它们不被触及。外壳提供的防护等级至少应为 IP3XD。如果保护导体穿过一个裸露的导电部件已被隔离的成套设备，并延伸到与成套设备负载端连接的电气设备，该成套设备则应配备连接外部保护导体的端子，并用适当的标记加以区别。

在外壳内部，保护导体及其端子应与带电部件绝缘，且裸露导电部件应采用与带电部件相同的方法进行绝缘。

e. 成套设备内部的裸露导电部件不应连接在保护电路上，即不应把裸露导电部件用于保护电路这一防护措施中。这同时也适用于内装电气元件，即使它们具有用于连接保护导体的端子。

f. 如果外壳上的门或覆板不使用钥匙或工具也可打开，则应配备一个用绝缘材料制成的挡板。此挡板不仅可防止无意识地触及可接近的带电部件，而且还可防止无意识地触及在打开覆板后可接近的裸露导电部件，因此，此挡板不使用工具应不能打开。

5.2 保护电路有效性验证

5.2.1 试验设备

接地电阻测试仪，其输出电流 AC 或 DC 至少 10A，输

出电流为 10A 时不能是负误差，通常选择电阻检测范围 0~200mΩ。

5.2.2 试验方法

(1) 成套设备的裸露导电部件和保护电路之间的有效连接验证。验证成套设备的不同裸露导电部件是否有效地连接在保护电路上，进线保护导体和相关的裸露导电部件之间的电阻不应超过 0.1Ω。

注意：试验时间应限制在 5s，否则低电流设备可能会受到试验的不利影响。

(2) 测试部位一般如下：

- 1) 主接地点与安装电器元件的板或门锁之间；
- 2) 主接地点与开关支架之间；
- 3) 主接地点与其他裸露导电部件之间。

其他裸露导电部件是指：电能表支架；端子排支架；抽出式功能单元在连接位置、试验位置和分离位置时元器件安装支架或安装板等。

成套设备裸露导电部件在下述情况下不会构成危险，则不需与保护电路连接：①不可能大面积接触或用手抓住；②裸露导电部件很小（大约 50mm×50mm），或者被固定在其位置上时，不可能与带电部件接触，如螺钉、铆钉和铭牌。也适用于接触器或继电器的衔铁、变压器的铁心（除非它们带有连接保护电路的端子）、脱扣器的某些部件等，不论其尺寸大小。

(3) 保护电路的短路强度试验。方法见 4.5。

5.2.3 试验结果判定

成套设备的不同裸露导电部件有效地连接在保护电路上，且进线保护导体和相关的裸露导电部件之间的电阻不超过 0.1Ω 为合格。

6 电气间隙和爬电距离测量

6.1 电气间隙测量

测量不同电位的两个导电部件间最短的空间直线距离。

6.1.1 测量部位

应在以下部位进行测量：

- (1) 带电部件与接地部件之间，不同极之间。
- (2) 对于处在隔离位置的抽出式部件断开的触点之间。
- (3) 抽出式部件在试验位置和分断位置时，该部件与主回路之间。

6.1.2 要求

电气间隙应使电路足以承受表 6.2-13 和表 6.2-5 给出的试验电压值。

已标明额定冲击耐受电压的设备，按表 6.2-13 确定设备的最小电气间隙，冲击、工频和直流试验电压的关系见表 6.2-7，电源系统的标称电压与设备的额定冲击耐受电压的关系见表 6.2-15。

对于表 6.2-13 中情况 B，即均匀电场，电气间隙应至少与表 6.2-13 给出的值相同。

成套设备内电器元件的间距应符合各自相关标准规定。在正常使用条件下也应该保持此距离。在异常情况（例如短路）下，不应永久地将母线之间、连接线之间、母线与连接线之间（电缆除外）的电气间隙或介电强度减小到小于与其直接相连的电气元件所规定的值。

6.1.3 测量电气间隙的方法

测量方法见 6.3。

6.1.4 试验结果判定

测量值不小于表 6.2-13 规定的值为合格。

表 6.2-13 空气中的最小电气间隙

额定冲击耐 受电压 U_{imp} (kV)	最小电气间隙 (mm)							
	情况 A 非均匀电场条件				情况 B 均匀电场 (理想条件下)			
	污染等级				污染等级			
	1	2	3	4	1	2	3	4
0.33	0.01				0.01			
0.5	0.04	0.2			0.04	0.2		
0.8	0.1		0.8		0.1		0.8	1.6
1.5	0.5	0.5		1.6	0.3	0.3		
2.5	1.5	1.5	1.5		0.6	0.6		
4	3	3	3	3	1.2	1.2	1.2	
6	5.5	5.5	5.5	5.5	2	2	2	2
8	8	8	8	8	3	3	3	3
12	14	14	14	14	4.5	4.5	4.5	4.5

注 最小的电气间隙值以大气压为 80kPa 时 (相当于海拔 2000m 处的正常大气压) 的 1.25/50 μ s 冲击电压为基准。

6.2 爬电距离测量

测量不同电位的两个导电部件之间沿绝缘材料表面的最短距离。

6.2.1 爬电距离的选定

表 6.2-14 爬电距离的最小值

设备额定绝缘 电压或实际工 作电压交流方 均根值或 直流 ^⑤ (V)	设备长期承受电压的爬电距离 (mm)														
	污染等级 1			污染等级 2				污染等级 3				污染等级 4			
	1 ^⑥	2 ^⑥	1												
	材料组别			材料组别				材料组别				材料组别			
	②	③	②	I ^①	Ⅱ	Ⅲa	Ⅲb	I	Ⅱ	Ⅲa	Ⅲb	I	Ⅱ	Ⅲa	Ⅲb
10	0.025	0.04	0.08	0.4	0.4	0.4		1	1	1		1.6	1.6	1.6	④
12.5	0.025	0.04	0.09	0.42	0.42	0.42		1.05	1.05	1.05		1.6	1.6	1.6	
16	0.025	0.04	0.1	0.45	0.45	0.45		1.1	1.1	1.1		1.6	1.6	1.6	
20	0.025	0.04	0.11	0.48	0.48	0.48		1.2	1.2	1.2		1.6	1.6	1.6	
25	0.025	0.04	0.125	0.5	0.5	0.5		1.25	1.25	1.25		1.7	1.7	1.7	
32	0.025	0.04	0.14	0.53	0.53	0.53		1.3	1.3	1.3		1.8	1.8	1.8	
40	0.025	0.04	0.16	0.56	0.8	1.1		1.4	1.6	1.8		1.9	2.4	3	
50	0.025	0.04	0.18	0.6	0.85	1.2		1.5	1.7	1.9		2	2.5	3.2	
63	0.04	0.063	0.2	0.63	0.9	1.25		1.6	1.8	2		2.1	2.6	3.4	
80	0.063	0.1	0.22	0.67	0.95	1.3		1.7	1.9	2.1		2.2	2.8	3.6	
100	0.1	0.16	0.25	0.71	1	1.4		1.8	2	2.2		2.4	3.0	3.8	
125	0.16	0.25	0.28	0.75	1.05	1.5		1.9	2.1	2.4		2.5	3.2	4	
160	0.25	0.4	0.32	0.8	1.1	1.6		2	2.2	2.5		3.2	4	5	
200	0.4	0.63	0.42	1	1.4	2		2.5	2.8	3.2		4	5	6.3	
250	0.56	1	0.56	1.25	1.8	2.5		3.2	3.6	4		5	6.3	8	
320	0.75	1.6	0.75	1.6	2.2	3.2		4	4.5	5		6.3	8	10	
400	1	2	1	2	2.8	4		5	5.6	6.3		8	10	12.5	
500	1.3	2.5	1.3	2.5	3.6	5		6.3	7.1	8.0		10	12.5	16	
630	1.8	3.2	1.8	3.2	4.5	6.3		8	9	10		12.5	16	20	
800	2.4	4	2.4	4	5.6	8		10	11	12.5		16	20	25	
1000	3.2	5	3.2	5	7.1	10		12.5	14	16		20	25	32	
1250			4.2	6.3	9	12.5		16	18	20		25	32	40	
1600			5.6	8	11	16		20	22	25		32	40	50	
2000			7.5	10	14	20		25	28	32		40	50	63	
2500			10	12.5	18	25		32	36	40	④	50	63	80	
3200			12.5	16	22	32		40	45	50		63	80	100	
4000			16	20	28	40		50	56	63		80	100	125	
5000			20	25	36	50		63	71	80		100	125	160	
6300			25	32	45	63		80	90	100		125	160	200	
8000			32	40	56	80		100	110	125		160	200	250	
10 000			40	50	71	100		125	140	160		200	250	320	

注 1. 工作电压为 32V 及以下的绝缘不会出现漏电或漏电起痕现象。然而必须考虑到电解腐蚀的可能性, 为此规定了最小的爬电距离值。
2. 按照 R10 数系选择电压值。
① 由于 GB/T 16935.1—1997 中 2.4 的条件, 材料组别 I 或材料组别 II、IIIa、IIIb 漏电起痕的可能性减小。
② 材料组别 I、II、IIIa、IIIb。
③ 材料组别 I、II、IIIa。
④ 此区域内的爬电距离值尚未确定。材料组别 IIIb 一般不推荐用于 630V 以上的污染等级 3, 也不推荐用于污染等级 4。
⑤ 作为例外, 对于额定绝缘电压 (V) 127, 208, 415, 440, 660/690 和 830, 可以采用分别对应于 125, 200, 400, 630 和 800 的较低挡的爬电距离值。
⑥ 这两栏中给出的值适用于印制线路材料的爬电距离。

对于污染等级 1 和污染等级 2, 爬电距离不应小于 6.1.2 条选择的相关的电气间隙。

对于污染等级 3 和污染等级 4, 即使电气间隙小于 6.1.2 条允许的情况 A 的值, 爬电距离也应不小于情况 A 的电气间隙, 以减少由于过电压引起击穿的危险性。

制造商应提供成套设备的额定绝缘电压、污染等级和材料组别, 按表 6.2-14 查出规定的爬电距离。

如果制造商未提供相关数据, 通常按污染等级 3 考虑。

按照相比漏电起痕指数 (CTI) 的数值范围, 材料组别分类如下:

材料组别 I: $600 \leq CTI$ 。

材料组别 II: $400 \leq CTI < 600$ 。

材料组别 IIIa: $175 \leq CTI < 400$ 。

材料组别 IIIb: $100 \leq CTI < 175$ 。

6.2.2 有加强筋

如果使用高度最小为 2mm 的加强筋, 不考虑其数量, 爬电距离可以减少至表 6.2-14 中值的 0.8 倍。


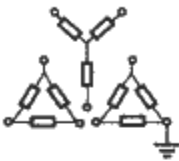


6.2.3 爬电距离的测量部位同 6.1.1 条

6.2.4 爬电距离的测量方法见 6.3

6.2.5 试验结果判定

测量值不小于表 6.2-14 规定的值为合格。

表 6.2-15 在采用符合 IEC 99-1 规定的浪涌抑制器进行过电压保护时，
电源系统的标称电压与设备额定冲击耐受电压之间的相应关系

额定工作电压 对地最大值 交流方均根值 或直流 (V)	电源系统的标称电压 (≤设备的额定绝缘电压) (V)				额定冲击耐受电压 (1.2/50μs) 优先值 (kV) (在海拔 2000m 时)			
	交流方均根值	交流方均根值	交流方均根值或直流	交流方均根值或直流	过电压类别			
					IV 电源进线点 (进线端) 水平	III 配电电路水平	II 负载 (装置设备) 水平	I 特殊保护水平
50	—		12.5, 24, 25, 30, 42, 48		1.5	0.8	0.5	0.33
100	66/115	66	60	—	2.5	1.5	0.8	0.5
150	120/208 127/220	115, 120 127	110, 120	220~110, 240~120	4	2.5	1.5	0.8
300	220/380, 230/400 240/415, 260/440 277/480	220, 230 240, 260 277	220	440~220	6	4	2.5	1.5
600	347/600, 380/660 400/690, 415/720 480/830	347, 380, 400 415, 440, 480 500, 577, 600	480	960~480	8	6	4	2.5
1000		660 690, 720 830, 1000	1000	—	12	8	6	4

6.3 有槽和筋的电气间隙和爬电距离测量

6.3.1 有槽部位的电气间隙和爬电距离测量

下面例 1~例 11 规定的槽宽度 X 的最小值适用于污染等级 1~4，见表 6.2-16。

污染等级	槽宽度 X 的最小值 (mm)
1	0.25
2	1.0
3	1.5
4	2.5

如果有关的电气间隙小于 3mm，凹槽最小宽度则可以减小至该电气间隙的 1/3。

测量爬电距离和电气间隙的方法在例 1~例 11 中示出。这些例子使得在间隙与槽之间，或各种绝缘形式之间没有什么区别。

而且：

- 1) 假定任意角被宽度为 X 的绝缘连接件在最不利的位置下桥接（见例 3）。
- 2) 当横跨槽顶部的距离为 X 或更大时，应沿着凹槽的轮廓测量爬电距离（见例 2）。
- 3) 在相对运动的部件处于最不利的位置时，测量这些部件之间的电气间隙和爬电距离。

6.3.2 有筋部位的电气间隙和爬电距离测量

由于筋对污染物的影响以及其具有较好的干燥效果，因此可以明显地减少泄漏电流的形成。筋的测量如图 6.2-8 所示，假设筋的最小高度为 2mm，则爬电距离可以减小至要求值的 0.8 倍。

【例 1】 条件：该爬电距离路径包括宽度小于 X (mm)、深度为任意的平行边或收敛形边的槽。

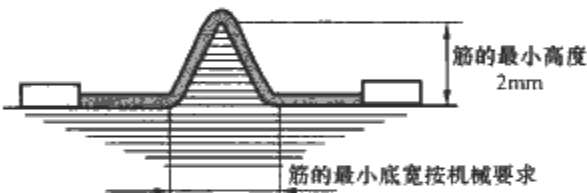


图 6.2-8 筋的测量

规则：爬电距离和电气间隙如图 6.2-9 所示，直接跨过槽进行测量。

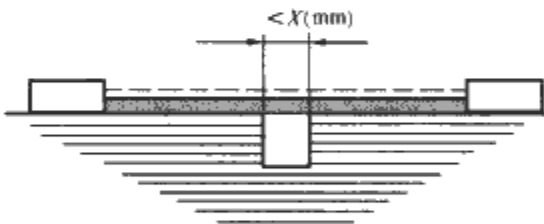


图 6.2-9 例 1 图

【例 2】 条件：此爬电距离路径包括任意深度且宽度不小于 X (mm) 的平行边的槽。

规则：电气间隙是图 6.2-10 中虚线的距离。爬电距离路径沿槽的轮廓测量。

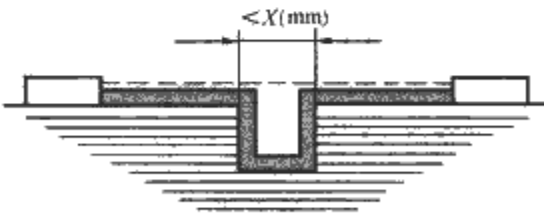


图 6.2-10 例 2 图

【例 3】 条件：此爬电距离路径包括宽度大于 X (mm) 的 V 形槽。

规则：电气间隙是图 6.2-11 中虚线的距离。爬电距离路径沿槽的轮廓但被 X (mm) 的连接把槽底“短路”。

【例 4】 条件：爬电距离路径包括一条筋。

规则：电气间隙是通过筋顶的最短直接空气路径。爬电

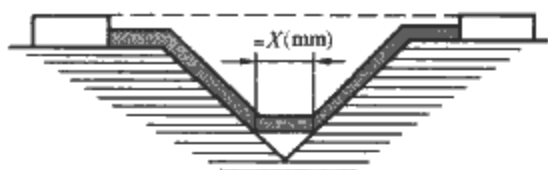


图 6.2-11 例 3 图

距离沿筋的轮廓如图 6.2-12 中虚线所示。

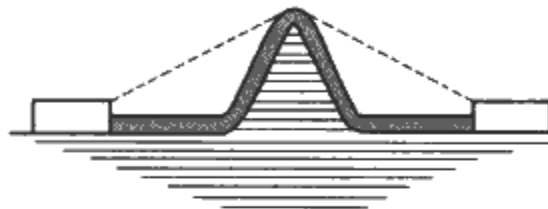


图 6.2-12 例 4 图

【例 5】 条件：爬电距离路径包括一条未浇合的接缝及每边宽度小于 X (mm) 的槽。

规则：电气间隙和爬电距离途径是如图 6.2-13 所示的虚线距离。

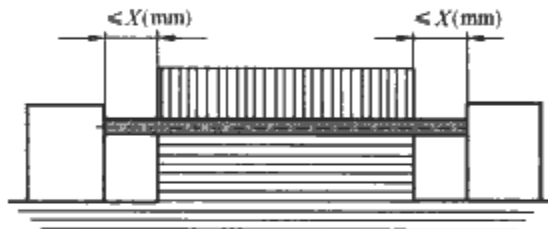


图 6.2-13 例 5 图

【例 6】 条件：此爬电距离路径包括一条未浇合的接缝以及每边宽度等于或大于 X (mm) 的槽。

规则：电气间隙为图 6.2-14 中虚线的距离。爬电距离路径沿槽的轮廓。

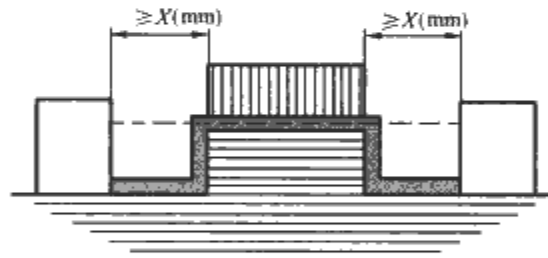


图 6.2-14 例 6 图

【例 7】 条件：爬电距离路径由未浇合的接缝以及一边宽度小于 X (mm) 而另一边宽度等于或大于 X (mm) 的槽构成。

规则：电气间隙和爬电距离路径如图 6.2-15 所示。

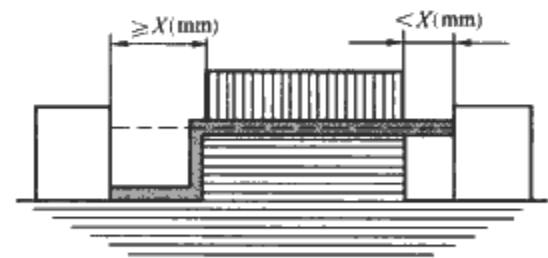


图 6.2-15 例 7 图

【例 8】 条件：穿过一条未浇合的接缝的爬电距离小于通过隔板顶部的爬电距离。

规则：电气间隙是通过隔板顶部的最短直接空气距离，如图 6.2-16 所示。

【例 9】 条件：应将螺钉头与凹壁之间足够宽的间隙考虑在内。

规则：电气间隙和爬电距离路径如图 6.2-17 所示。

【例 10】 条件：螺钉头与凹壁之间的间隙过于窄小，

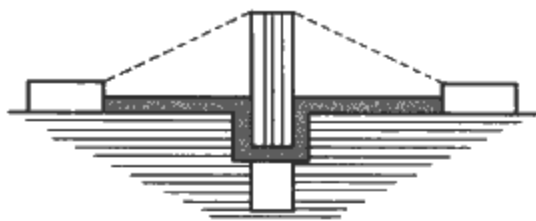


图 6.2-16 例 8 图

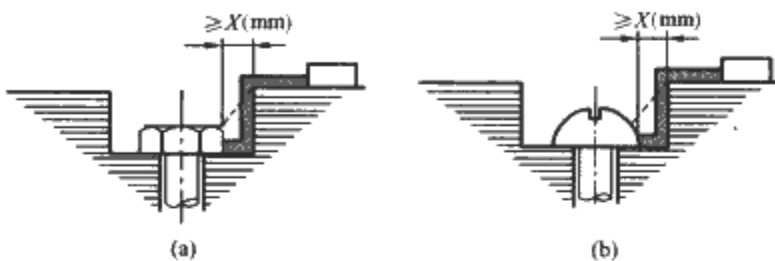


图 6.2-17 例 9 图

以至不必考虑。

规则：当距离等于 X (mm) 时，测量爬电距离是从螺钉至槽壁，如图 6.2-18 所示



图 6.2-18 例 10 图

【例 11】 电气间隙为 $d+D$ 的距离，爬电距离也为 $d+D$ 的距离，如图 6.2-19 所示。

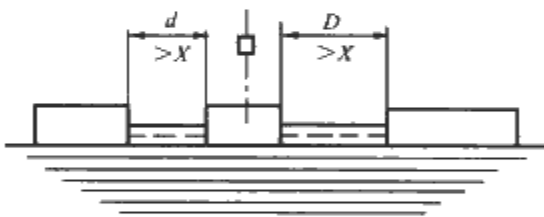


图 6.2-19 例 11 图

图 6.2-9~图 6.2-19 中：---表示电气间隙；——表示爬电距离。

7 机械操作试验

7.1 试验方法及要求

(1) 对于按照其有关规定进行过型式试验的成套设备的器件，只要在安装时机械操作部件无损坏，则不必对这些器件进行此型式试验。

(2) 对于需要作此项型式试验的部件，在成套设备安装好之后，应验证机构操作是否良好，操作循环次数应为 50 次。

注意：对于抽出式功能单元，一次操作循环应从连接位置到分离位置，然后再回到连接位置。

7.2 试验结果

检查相关的机械联锁机构的操作。如果器件、联锁机构等的工作条件未受影响，而且操作力与试验前一样，则认为试验通过。

8 防护等级试验

8.1 试验设备

试验设备包括：球形物体、铰接试指、钢试球、钢试

具、淋水、潜水试验设备和防尘试验设备。

8.2 防水、防尘试验的环境条件

除非有关产品标准另有规定，试验应在规定的标准环境条件下进行。

试验时，推荐的环境条件如下：

温度范围：15~35℃。

相对湿度：25%~75%。

大气压力：86~106kPa。

8.3 试验方法及要求

(1) 按 GB 4208 的规定检查设备的外壳防护等级，应符合相关外壳防护等级的规定。

户内使用的成套设备如果没有防水要求，下列 IP 值为优选参考值：IP00，IP2X，IP3X，IP4X，IP5X。

(2) 封闭式成套设备安装好后，其防护等级至少应

为 IP2X。

(3) 对于无附加防护设施的户外成套设备，第二位特征数字应至少为 3。对于户外成套设备，附加的防护措施可以是防护棚或类似设施。

(4) 如果成套设备的某个部分（例如工作面）的防护等级与主体部分的防护等级不同，则制造商应单独标出该部位的防护等级。例如：IP00——工作面 IP20。

(5) 用挡板和隔板对成套设备进行内部隔离时，其防护等级至少应达到：①防止触及相邻功能单元的危险部件，防护等级至少 IPXXB；②功能单元与功能单元之间，防护等级至少为 IP2X。

8.4 防护等级的含义及试验方法

防护等级中各特征数字、附加字母含义及试验方法见表 6.2-17~表 6.2-19。

表 6.2-17 第一位特征数字防护等级

第一位特征数字	对接近危险部件防护		对固体异物进入防护		
	含 义	试验用力 (N)	简要说明	含 义	试验用力 (N)
0	—		无防护	—	
1	直径 50mm 球形试具应与危险部件有足够的间隙	50±5	防止直径不小于 50mm 的固体异物	直径 50mm 球形物体试具不得完全进入壳内	50±5
2	直径 12mm，长 80mm 的铰接试指与危险部件有足够的间隙	10±1	防止直径不小于 12.5mm 的固体异物	直径 12.5mm 球形物体试具不得完全进入壳内	30±3
3	直径 2.5mm 的试具不得进入壳内	3±0.3	防止直径不小于 2.5mm 的固体异物	直径 2.5mm 物体试具完全不得进入壳内	3±0.3
4	直径 1.0mm 的试具不得进入壳内	1±0.1	防止直径不小于 1.0mm 的固体异物	直径 1.0mm 物体试具完全不得进入壳内	1±0.1
5	直径 1.0mm 的试具不得进入壳内	1±0.1	防尘	不能完全防止尘埃进入，但进入的灰尘量不得影响设备的正常运行，不得影响安全	—
6	直径 1.0mm 的试具不得进入壳内	1±0.1	尘密	无灰尘进入	—

表 6.2-18 第二位特征数字防护等级

第二位特征数字	简要说明	含 义	滴水量或流量	试验持续时间
0	无防护	—	—	—
1	防止垂直方向滴水	垂直方向滴水应无有害影响	1 ⁰ _{0.5} mm/min	10min
2	防止当外壳在 15°范围内倾斜时垂直方向滴水	当外壳的各垂直面在 15°范围内倾斜时，垂直滴水应无有害影响	3 ⁰ _{0.5} mm/min	每一个倾斜位置 2.5min
3	防淋水	各垂直面在 ±60°范围内淋水，无有害影响	使用摆管：每孔 0.07L/min × (1±5%)，再乘以孔数；使用淋水喷头：10L/min × (1±5%)	10min 1min/m ² 至少 5min
4	防溅水	向外壳各个方向溅水，无有害影响	同数字 3	同数字 3
5	防喷水	向外壳各个方向喷水，无有害影响	12.5L/min × (1±5%)	1min/m ² 至少 3min
6	防强烈喷水	向外壳各个方向强烈喷水，无有害影响	100L/min × (1±5%)	1min/m ² 至少 3min
7	防短时间浸水影响	浸入规定压力的水中经规定时间后，外壳进水量不致达到有害程度	—	至少 30min
8	防持续潜水影响	按生产厂和用户双方同意的条件（应比数字 7 严酷）持续潜水后，外壳进水量不致达到有害程度	—	由用户和制造厂协商

表 6.2-19 附加字母所代表的对接近危险部件的防护等级

附加字母	防 护 等 级	
	简要说明	含 义
A	防止手背接近	直径 50mm 球形试具与危险部件必须保持足够的间隙
B	防止手指接近	直径 12mm，长 80mm 的铰接试指与危险部件必须保持足够的间隙
C	防止工具接近	直径 2.5mm，长 100mm 的试具与危险部件必须保持足够的间隙
D	防止金属线接近	直径 1.0mm，长 100mm 的试具与危险部件必须保持足够的间隙

注 “足够的间隙”指：试具不能触及危险带电部件。
如果足够的间隙是通过试具与危险部件的指示灯电路来检验，试验时指示灯应不亮。
某些型式的电气设备内部产生的最高电压（工作电压的方均根值或直流值）比设备的额定电压值要高，产品标准在确定耐电压试验的电压和足够的间隙时，应考虑这个最大电压值的影响。

淋水试验后，如在外壳内可立刻容易地看到水痕，应根据本章 3 验证其介电性能。
如果成套设备进行了短路强度验证，则在短路强度验证前后均需验证外壳防护等级。

8.5 试验结果判定

试验结果符合相应防护等级的要求，则试验通过。

9 连接线、通电操作

9.1 开关器件和元件的选择与安装检查

9.1.1 开关器件和元件的选择

成套设备内装的开关器件和元件应符合其相关标准及设计图纸的要求，应按制造厂的说明书进行安装，用于出线电路的熔断器应符合 GB 13539.3 的一般要求。
开关器件和元件的额定电压（额定绝缘电压、额定冲击耐受电压等）、额定电流、使用寿命、接通和分断能力、短路耐受强度等应适合于成套设备外形设计的特殊用途（例如开启式和封闭式）。
开关器件和元件的短路耐受强度或分断能力不足以承受安装场合可能出现的应力时，应利用限流保护器件（如熔断器或断路器）对元件进行保护。为内装的开关器件选择限流保护器件时，为了照顾到协调性，应当考虑元件制造商规定的最大允许值。

开关器件和元件的协调，例如：电机起动器和短路保护器件的协调，应符合相关的标准。
在制造商标明了额定冲击耐受电压的电路中，其开关器件和元件不应产生高于该电路的额定冲击耐受电压的开关过电压。而且，也不应承受高于该电路的额定冲击耐受电压的开关过电压。在选择用于给定电路上开关的器件和元件时，应考虑后一点。

例如：额定冲击耐受电压 $U_{imp}=4000V$ ，额定绝缘电压 $U_i=250V$ 和最大开关过电压为 1200V（在 230V 额定工作电压时）的开关器件和元件可以用于过电压类别^① I、II、III 的电路中，甚至用于采用了适当的过电压保护措施 IV 类电路中。

9.1.2 开关器件和元件的安装

开关器件和元件应按照制造商说明书（使用条件、飞弧距离、隔弧板的移动距离等）进行安装。
元器件必须便于安装维修，元器件安装操作方向必须符合规定，安装要牢固可靠，螺钉必须拧紧，无打滑及损坏现象。

（1）可接近性。安装在同一支架（安装板、安装框架）

上的电器元件、单元和外接导线的端子的布置应使其在安装、接线、维修和更换时易于接近。尤其是外部接线端子，建议设于地面安装成套设备的基础面上方至少 0.2m，并且端子的安装方法应使电缆易于与其连接。
必须在成套设备内进行调整和复位的元件应是易于接近的。
一般来讲，对于地面安装的成套设备，由操作人员观察的指示仪表不应安装在高于成套设备基础面 2m 处。操作器件，如手柄、按钮等，应安装在易于操作的高度上，即其中心线一般不应高于成套设备基础面 2m。
注意：紧急开关器件的操动机构在高于地面 0.8~1.6m 的范围内是易于接近的。对于墙上安装和地面安装的成套设备，应安装在可以满足上述关于可接近性的要求和操作高度的位置上。
（2）相互作用。成套设备内开关器件和元件的安装与接线应使其本身的功能不致由于正常工作中出现相互作用（如热、电弧、振动、能量场）而受到破坏。如果是电子成套设备，应把控制电路与电源电路进行隔离或屏蔽。
如果成套设备内安装熔断器等发热元件，应特别考虑发热的影响。
（3）挡板。手动开关电器的挡板的设计应使电弧对操作者不产生任何危险。为了减少更换熔芯时的危险，应使用相间挡板，如果熔断器的设计和结构已考虑了这一点，则不要求使用相间挡板。
（4）安装场地的条件。选择成套设备内所用的开关器件和元件应以本章中 3.2 规定的成套设备的正常工作条件为依据。
根据有关规定，必要时，应采取一些适当的措施（如加热、通风）以保证维持正常工作所需要的使用条件，如继电器、仪表、电子元件等维持正常运行时所需要的最低温度。
（5）冷却。可以为成套设备提供自然冷却或强行冷却。安装场地如果要求有特殊措施保证良好的冷却，则制造商应提供必要的资料，例如给出与阻碍散热或自身产生热的部件之间的距离。
9.1.3 固定式部件
就固定式部件而言，主电路的连接只能在成套设备断电的情况下进行接线和断开。一般情况下，固定式部件的拆卸与安装要使用工具。
固定式部件的断开可以要求全部或部分断开成套设备。
为了防止未经许可的操作，开关器件可以带有机机构，以保证把它锁在一个或多个位置上。在某些条件下，如果允许在带电情况下进行工作，则必须采取有效的安全措施。
9.1.4 可移式部件和抽出式部件
（1）设计。可移式部件或抽出式部件的设计应使其电气

① 过电压类别可参见 GB 7251.1 中 2.9.12 和附录 G。

设备即使在主电路带电的情况下,亦可安全地从主电路上断开或接通。可移式部件和抽出式部件可以配备插入式联锁^①。在不同位置以及从一种位置转移到另一种位置时,应保持最小的电气间隙和爬电距离。

注意:上述操作允许使用专用的工具,并应保证这些操作在空载情况下进行是必要的。

可移式部件应具有连接位置和移出位置。

抽出式部件还应具有一分离位置及试验位置,或试验状态。它们应能分别地在这些位置上定位。这些位置应能清晰地识别。

(2) 抽出式部件的联锁和挂锁。除非另有规定,抽出式部件应配备一个器件,以保证在主电路已被切断以后,其电器才能抽出和重新插入。

为了防止未经许可的操作,可以给抽出式部件提供一个锁或挂锁,以将它们固定在一个或几个位置上。

(3) 防护等级。为成套设备所规定的防护等级一般适合于可移式和/或抽出式部件的连接位置,制造商应指出在其他位置和在不同位置之间转移时所具有的防护等级。

带有抽出式部件的成套设备可设计成在试验位置和分离位置以及一个位置向另一个位置转换时仍保持如同连接位置时的防护等级。

如果在可移式部件或抽出式部件移出以后,成套设备不能保持原来的防护等级,应达成采用某种措施以保证适当防护的协议。制造商产品目录中给出的资料可以作为这种协议。

(4) 辅助电路的连接方式。辅助电路应设计成在使用工具或不使用工具的情况下都能断开。如果是抽出式部件,辅助电路的连接应尽可能不使用工具。

9.1.5 鉴别

(1) 主电路和辅助电路导体的鉴别。除了下述(2)中提到的情况外,鉴别导体的方法和范围,例如利用连接端子上的或在导体本身末端上的排列、颜色或符号,应由制造商负责,并且应与接线图和图样上的标志一致。

(2) 保护导体(PE、PEN)和主电路的中性导体(N)的鉴别。用形状、位置、标志或颜色应很容易地区别保护导体。如果用颜色区别,必须是绿色和黄色(双色)。如果保护导体是绝缘的单芯电缆,也应采用此种颜色鉴别法。颜色标记最好贯穿导线的整个长度。

注意:绿、黄双色鉴别标志严格地专供保护导体之用。

主电路的任何中性导体用形状、位置、标志或颜色应很容易区分。如用颜色进行鉴别,建议选用浅蓝色。

外接保护导体的端子应标注图形符号^①。如果外部保护导体与能明显识别的带有黄绿颜色的内部保护导体连接时,则不要求此符号。

(3) 开关位置的指示和操作方向。元件或器件操动机构的操作方向应符合规定。

指示灯及按钮的颜色及其含义见表 6.2-20。

表 6.2-20 指示灯及按钮的颜色及其含义

颜 色	含 义		
	人身或环境的安全	过程状况	设备状态
红	危险	紧急	故障
黄	警告、注意	异常	异常
绿	安全	正常	正常
蓝	指令性含义		
白、灰、黑	未赋予具体含义		

(4) 用挡板或隔板实现成套设备内部的隔离。用挡板或隔板(金属的或非金属的)将成套设备分成单独的隔室或封闭的防护空间以达到下述一种或几种状态:

1) 防止触及相邻功能单元的危险部件,防护等级至少应为 IPXXB。

2) 防止固体外来物从成套设备的一个单元进入相邻的单元,防护等级至少应为 IP2X(防护等级 IP2X 包括了防护等级 IPXXB)。

如果制造商没有提出异议,则上述两个条件应适用。

用挡板或隔板进行隔离的典型形式见表 6.2-21。

表 6.2-21 用挡板或隔板进行隔离的典型形式

主判据	补充判据	典型形式 ^①
不隔离		形式 1
母线与功能单元隔离	外接导体端子不与母线隔离	形式 2a
	外接导体端子与母线隔离	形式 2b
母线与功能单元隔离,所有的功能单元相互隔离,外接导体的端子与功能单元隔离,但端子之间相互不隔离	外接导体端子不与母线隔离	形式 3a
	外接导体端子与母线隔离	形式 3b
母线与功能单元隔离,并且所有的功能单元相互隔离,也包括作为功能单元组成部分的外接导体的端子	外接导体端子与关联的功能单元在同一隔室中	形式 4a
	外接导体端子与关联的功能单元不在同一隔室中,它位于单独的、隔开的、封闭的防护空间中或隔室中	形式 4b
不隔离		

① 典型隔离形式见 GB 7251.1—2005 附录 D。

隔离形式和更高的防护等级应服从于制造商与用户之间的协议。

有关挡板或隔板的稳定性或耐久性见 5.1.1 中(2)2)。

有关对已断路的功能单元进行维修时的可接近性见 GB 7251.1—2005 中 7.4.6.2;有关在带电的情况下扩展设备时的可接近性见 GB 7251.1—2005 中 7.4.6.3。

9.2 母线与绝缘导线

9.2.1 总则

正常的温升、绝缘材料的老化和正常工作时所产生的振动不应造成载流部件的连接有异常变化。尤其应考虑到不同金属材料的热膨胀和电解作用以及实际温度对材料耐久性的影响。

载流部件之间的连接应保证有足够的和持久的接触压力。

9.2.2 母线和绝缘导线的尺寸选择

成套设备内导体截面积的选择由制造商负责。除了必须承载的电流外,选择截面积还受下述条件的支配:成套设备所承受的机械应力,导体的敷设方法、绝缘类型和(如适用的话)所连接的元件种类(如电子的)。

① 插入式联锁指一种防止可移式或抽出式部件插入固定式部件的装置,而此固定式部件不是打算用作上述可移式或抽出式部件的。

9.2.3 布线

- (1) 应该至少按照有关电路的额定绝缘电压确定绝缘导线。
- (2) 两个连接器件之间的导线不应有中间接头或焊接点。应尽可能在固定的端子上进行接线。
- (3) 绝缘导线不应支靠在不同电位的裸带电部件和带有尖角的边缘上，应用适当的方法固定绝缘导线。
- (4) 在覆板或门上连接电器元件和测量仪器的导线的安装，应用软导线，并且要有足够的长度裕量，以免急剧弯曲或过度张力损坏导线。
- (5) 在成套设备中对电气元件进行焊接连接时，只有在电气元件上对此类连接采取了措施时，才是允许的。如设备在正常工作时遭受强烈的振动，则应采用辅助方法将焊接电缆或接线机械固定在离焊接点较近的地方。
- (6) 在正常工作时剧烈振动的地方，例如在挖掘机上、起重机上、船上、电梯设备和机车上，应注意将导线固定住。除了上述 (5) 所述的电器元件外，在剧烈振动条件下，电缆焊接片和绞股导线的焊接端头都是不适用的。
- (7) 通常，一个端子上只能连接一根导线，只有在端子是为此用途而设计的情况下才允许将两根或多根导线连接到一个端子上。
- (8) 主电路相序排列应符合表 6.2-22 的要求。

表 6.2-22 主电路相序排列			
类 别	垂直排列	水平排列	前后排列
L1 (U) 相	上方	左方	远方
L2 (V) 相	中间	中间	中间
L3 (W) 相	下方	右方	近方
正极 (+)	上方	左方	远方
负极 (-)	下方	右方	近方
中性线 (接地中性线)	最下方	最右方	最近方

9.2.4 安装

母排连接处应自然吻合，不应有应力。

9.3 防护措施检查

见本章 5.1。

9.4 铭牌标志检查

设备的铭牌及标志应正确、清晰、齐全，且易于辨析，安装位置正确。

9.4.1 铭牌

每台成套设备应配备一至数个铭牌，铭牌应坚固、耐久，其位置应该是在成套设备安装好后易于看见的地方，而且字迹要清楚。

铭牌上应包括：①制造商（生产厂）或商标；②型号或标志号，或其他标记，据此可以从制造商得到有关的资料；③产品标准，如 GB 7251.1；④电流类型（以及在交流情况下的频率）；⑤额定工作电压；⑥额定绝缘电压，如制造商已标明，可标为额定冲击耐受电压；⑦辅助电路的额定电压（如适用）；⑧工作限值；⑨每条电路的额定电流（如适用）；⑩短路耐受强度；⑪防护等级；⑫对人身的防护措施；⑬户内使用条件、户外使用条件或特殊使用条件（如果不同于 3.2 中给出的正常使用条件），如制造商已标明，则为污染等级；⑭为成套设备所设计的系统接地型式；⑮外形尺寸，其顺序为高度、宽度（或长度）、深度；⑯质量；⑰内部隔

离形式；⑱功能单元的电气连接形式；⑲环境 1 或环境 2。

上述①、②项应在铭牌上标出，其余项可以在铭牌上给出，也可以在制造商的技术文件中给出。

9.4.2 标志

在成套设备内部，应能辨别出单独的电路及其保护器件。如果要标明成套设备电器元件，所用的标记应与随同成套设备一起提供的接线图上的标记一致。

9.5 结构检查

检查柜（台）体及面板表面应平整无凹凸现象，油漆颜色应均匀，在距离设备 1m 处观察不应有明显的色差和反光，漆层整洁美观，不应有起泡、裂纹和流痕现象。柜体材料和漆层应是非易燃的或自熄的。

9.6 机械操作零部件、联锁、锁扣检查

检查所有机械操作零部件、联锁、锁扣等运动部件的动作应灵活，动作效果应正确。

9.7 技术数据检查

应检查成套设备与制造商提供的电路、接线图和技术数据是否相符。

9.8 出厂技术资料图纸检查

检查随设备出厂的技术文件应完整，电路图、接线图和技术数据应与设备相符合。

9.9 通电操作

试验前应按照设备的原理图检查装置的内部接线，当所有接线正确无误后，通以规定的额定电压，通电操作 5 次，所有电器元件的动作应灵活可靠，显示应正确无误。

9.10 试验结果

符合以上检测项目要求为合格。

10 绝缘电阻测量

10.1 试验设备

试验设备为绝缘电阻表，其额定电压最少为 500V。

10.2 试验条件

设备的绝缘电阻测试，应在电路无电的状态下进行。绝缘电阻表（俗称兆欧表）的电压等级应按表 6.2-23 的规定选取。对不能承受兆欧表电压等级的元器件，测量前应将其短接或拆除。

表 6.2-23 试验仪器的电压等级	
设备额定电压 U_N (V)	测量仪器的电压等级 (V)
$U_N < 500$	500
$500 \leq U_N < 1000$	1000
$U_N \geq 1000$	2500

10.3 试验程序

(1) 对不能承受绝缘电压等级的元件，在施加试验电压时，消耗电流的器件（如线圈、测量仪器）在测量前应将其拆除或短接。

- (2) 试验电压应施加于主电路、辅助电路与裸露的导电部件之间。
- (3) 主开关电器在断开位置时同极的进、出线之间，开关电器在闭合位置时不同极的带电部件之间。
- (4) 各带电部件与金属框架之间。
- (5) 对于额定工作电压不同的电路应分别进行测量。

10.4 试验结果判定

测得每条电路的对地标称电压的绝缘电阻至少为1000Ω/V，则认为合格。

11 EMC 试验

11.1 简述

- (1) 可免除此项试验的设备，以下情况不要求进行EMC试验：
 - 1) 在主要与低压公共电网有关或主要与低压非公共电网、工业电网有关的环境进行设计的组合器件和元件符合相关的产品标准或一般的 EMC 标准。
 - 2) 内部安装及接线是按照元器件制造厂的说明书进行的（关于相互影响，电缆屏蔽和接地等方面的安排）。
 - (2) 环境条件：
 - 1) 环境温度：15~35℃。
 - 2) 相对湿度：10%~75%。
 - 3) 大气压力：86~106kPa。
- 实验室的电磁环境不应影响试验结果。

11.2 低频扰动

11.2.1 电压波动

被试设备在正常条件下工作，调节电源输入电压变化为额定电压的±10%，短时（小于0.5s）电源变化为额定电压的-15%~+10%的情况下，设备应能正常工作。

11.2.2 频率波动

调节供电电源频率为50Hz±1Hz变化时，设备应能正常工作。

11.3 高频干扰

高频扰动试验主要是浪涌（冲击）、电快速瞬变脉冲群抗扰度试验、静电放电、射频电磁场辐射试验，评定准则见表6.2-24。

表 6.2-24 评 定 准 则		
项 目	A	B
一般系统的性能	工作特性没有明显的变化，在工作的允差之内正常工作	工作特性有明显（可见的或可听到的）的变化，可自行恢复
显示和控制面板的工作性能	显示信息无变化，只是光亮度略有衰减，或者字符稍有变动	信息有可见的暂时性变化，光亮度不理想

11.3.1 浪涌（冲击）

- 该试验的目的是检验同通信线路相连的设备对由如雷电引起的浪涌骚扰抗扰度，它适用于终端设备（如调制/解调器）及具有控制输入/输出口、通过通信端口来发送和接收信息的类似设备。
- (1) 试验设备。设备选用组合波（混合）信号发生器

- (1.2/50~8/20μs)，它能产生1.2/50μs的电压浪涌（开路状态下）和8/20μs的电流浪涌（短路情况），被称为组合波浪涌信号发生器（CWG）或混合信号发生器。
- 组合波信号发生器的特征与性能如下：
 - 开路输出电压：至少在0.5~4.0kV范围内能输出。
 - 浪涌电压波形参数：见表6.2-25。
 - 开路输出电压容差：+10%。
 - 短路输出电流：至少在0.25~2.0kA范围内能输出。
 - 极性：正/负。
 - 相位偏移：随交流电源相角在0~360°变化。
 - 重复率：每分钟至少一次。
- 应该使用输出端浮地的信号发生器，频率范围不小于10MHz。

表 6.2-25 波形参数的规定		
波 形	根据 GB 16927.1	
	波前时间 (μs)	半峰值时间 (μs)
开路电压	1.2	50
短路电流	8	20

- (2) 试验程序。
 - 1) 试验等级。应根据安装类别来选择，见表6.2-26。

表 6.2-26 安装类别及试验等级								
安装类别	试验等级 (kV)							
	电源耦合方式		不平衡工作电路/线路 (LDB) 耦合方式		平衡工作电路/线路耦合方式		SDB, DB ¹⁾ 耦合方式	
	线—线	线—地	线—线	线—地	线—线	线—地	线—线	线—地
0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1	NA	0.5	NA	0.5	NA	0.5	NA	NA
2	0.5	1.0	0.5	1.0	NA	1.0	NA	0.5
3	1.0	2.0	1.0	2.0 ³⁾	NA	2.0 ³⁾	NA	NA
4	2.0	4.0 ²⁾	2.0	4.0 ³⁾	NA	2.0 ³⁾	NA	NA
5	2)	2)	2.0	4.0 ²⁾	NA	4.0 ²⁾	NA	NA
×								

- 注 1. DB表示数据总线；SDB表示短距离总线；LDB表示长距离总线；NA表示不适用。
- 2. 安装类别：
 - 0类：保护良好的电气环境，常常在一间专用房间内。浪涌电压不超过25V。
 - 1类：有部分保护环境。浪涌电压不超过500V。
 - 2类：电缆隔离良好。浪涌电压不超过1000V。
 - 3类：电源电缆和信号电缆平行敷设的电气环境。浪涌电压不超过2000V。
 - 4类：互连线作为户外电缆一样走线甚至连到高压设备上。浪涌电压不超过4000V。
 - 5类：接地故障电流达10kA和雷电电流达100kA引起的干扰电压。
 - 1) 距离从10m到最长30m，有特别的结构并经过专门的布置。对10m以下的互连电缆不做试验，仅第二类适用。
 - 2) 取决于当地电力系统的等级。
 - 3) 通常带第一级保护进行试验。
- 2) 耦合/去耦网络：
 - a. 用于电源线的电容耦合（并联耦合）
- 在接入电源去耦网络的同时，还可以通过电容耦合将试

验电压按线—线或线—地方式加入。如果没有其他规定，装置和耦合/去耦网络之间的电源线长度为 2m（或更短）。

耦合/去耦网络的额定参数：

耦合电容 C ：9 μ F 或 18 μ F。

电源去耦电感 L ：1.5mH。

当装置、供电网络没有与去耦网络连接时，在去耦网络电源输入端上的残余浪涌电压不应超过所施加试验电压的 15%或电源电压峰值的 2 倍，两者中取较大者。

- b. 用于电源线的电感耦合（通过串联变压器耦合）
用于电源线的电感耦合正在考虑之中。

c. 用于互连线的电容耦合

对于非屏蔽不平衡 I/O 线路，当电容耦合对该线上的通信功能没有影响时推荐使用此方法，其应用如图 6.2-20 所示，包括线—线耦合和线—地耦合。如果没有其他规定，装置和耦合/去耦网络之间的电源线长度为 2m（或更短）。

对开关 S1：线—地，置于“0”；线—线，置于“1”~“4”。

对开关 S2：试验时置于“1”~“4”，但与 S1 不在相同的位置。

选 $L=20$ mH， R_L 为 L 的电阻部分。

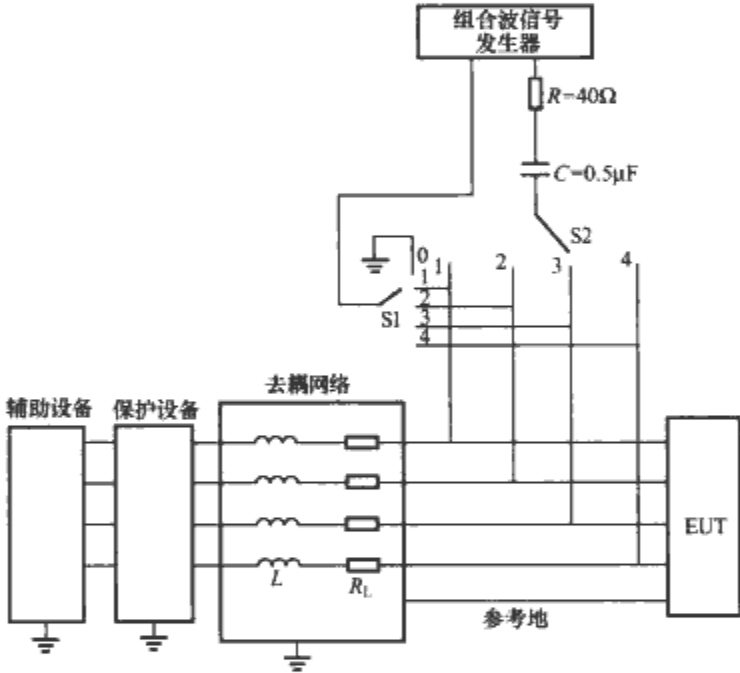


图 6.2-20 非屏蔽互连线电容耦合的试验配置
示例：线—线/线—地耦合，用电容器耦合

电容耦合/去耦网络的额定参数：

耦合电容 C ：0.5 μ F。

去耦电感 L （没有补偿电流时）：20mH。

注意：应考虑信号电流容量，它取决于受试线路。应按线—线和线—地方式施加浪涌，进行线—地试验时，如果没有其他规定，试验电压必须依次加到每根线和地之间。如果没有其他规定，则浪涌应在交流电压波（正和负）的零值和峰值的电压相位处同步加入。

3) 对每一极性（正/负）至少进行 5 次试验，相邻脉冲的时间间隔为 1min，相邻两个脉冲的极性相反。

(3) 试验结果判定。应符合表 6.2-24 的规定。

11.3.2 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验

(1) 试验设备。设备选用电快速瞬变脉冲群发生器，其主要部件包括高压源、充电电阻、储能电容器、放电器、脉冲持续形成电阻、阻抗匹配电阻和隔直电容器。

(2) 电快速瞬变脉冲群发生器性能特性。开路输出电压范围（在储能电容器两端的电压） $0.25 \times (1-10\%) \sim 4 \times (1+10\%)$ kV 发生器应能在短路的条件下工作。

表 6.2-27 在接负载 50Ω 时的运行特性

项 目	特 性
最大能量	4mJ/脉冲(在 2kV 接 50Ω 负载时)
极性	正极性、负极性
输出形式	同轴
动态源阻抗 ^①	$50 \times (1 + 20\%) \Omega$ (在 1~100MHz 之间)
发生器内的隔直电容	10nF
脉冲重复频率	与选择的试验等级有关
单个脉冲的上升时间	$5 \times (1 \pm 30\%)$ ns
脉冲持续时间(50%值)	$50 \times (1 \pm 30\%)$ ns
输出到 50Ω 负载时的脉冲波形	见表 6.2-28 和图 6.2-21
与电源的关系	异步
脉冲群持续时间	$15 \times (1 \pm 20\%)$ ms, 见表 6.2-28 和图 6.2-22
脉冲群周期	$300 \times (1 \pm 20\%)$ ms, 见表 6.2-28 和图 6.2-22

① 源阻抗可通过分别在无负载和 50Ω 负载条件下测量脉冲的峰值加以验证（比例为 2:1）。

表 6.2-28 50Ω 负载时电快速瞬变脉冲群发生器校验特性

项 目	特 性	
脉冲上升时间	$5 \times (1 \pm 30\%)$ ns	
脉冲的持续时间(50%值)	$50 \times (1 \pm 30\%)$ ns	
脉冲的重复频率和输出电压的峰值	输出电压的峰值(kV)	重复频率(kHz)
	0.125	$5 \times (1 \pm 20\%)$
	0.25	$5 \times (1 \pm 20\%)$
	0.5	$5 \times (1 \pm 20\%)$
	1.0	$5 \times (1 \pm 20\%)$
	2.0	$2.5 \times (1 \pm 20\%)$

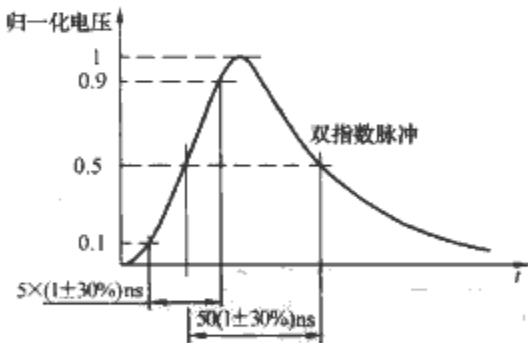


图 6.2-21 接 50Ω 负载时单个脉冲的波形

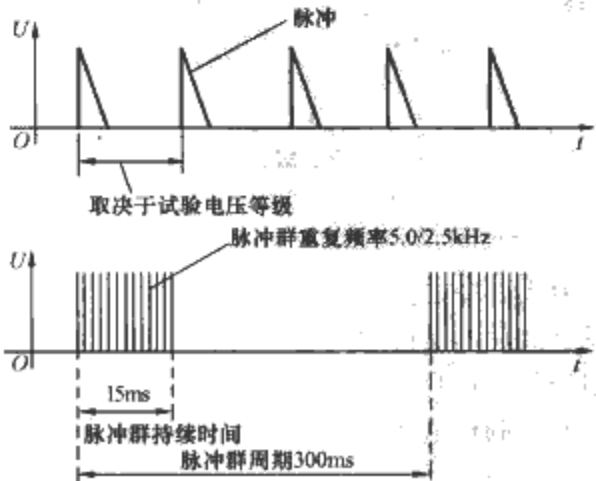


图 6.2-22 快速瞬变脉冲群概略图

(3) 试验程序:

1) 试验等级相对应的试验参数见表 6.2-29。

表 6.2-29 试验等级相对应的试验参数

开路输出试验电压 (±10%) 和脉冲的重复频率 (±20%)				
等级	在供电电源端口、 保护接地 (PE)		在 I/O (输入/输出) 信号、 数据和控制端口	
	电压峰值 (kV)	重复频率 (kHz)	电压峰值 (kV)	重复频率 (kHz)
1	0.5	5	0.25	5
2	1	5	0.5	5
3	2	5	1	5
4	4	2.5	2	5
× ^①	特定	特定	特定	特定

① ×表示一个开放等级, 在专用设备技术规范中必须对这个级别加以规定。

注意: 对于受试设备 I/O、控制、信号和数据端口, 试验电压为电源端口试验电压的一半。

这些开路输出电压将显示在电快速瞬变脉冲群发生器上。有关试验等级的选择, 建议根据工作环境按表 6.2-30 的要求选择。

表 6.2-30 试验等级的选择 (根据工作环境)

试验等级的选择				
试验级别	1	2	3	4
工作环境	具有良好的 保护环境	受保护的环境	典型的工业 环境	严酷的工业 环境
环境代表	计算机机房	控制室或 终端室	发电厂或高 压变电站的 继电器房	露天的高压 变电站

2) 受试设备的放置:

a. 应放置在接地参考平面上 (接地参考平面采用铜或铝金属板时其厚度不小 0.25mm, 采用其他金属材料其厚度至少为 0.65mm), 并用厚度 0.1m±0.01m 的绝缘支座与之隔开。

b. 接地参考平面的最小尺寸为 1m×1m, 各边至少应比受试设备超出 0.1m。受试设备距离导电结构 (例如屏蔽室的墙壁) 应大于 0.5m。

c. 若受试设备为台式设备, 应放置在接地参考平面上方 0.8m±0.08m 处。

d. 耦合装置和受试设备之间的信号线和电源线的长度不大于 1m。如果制造商提供的与设备不可拆卸的电源电缆的长度超过 1m, 则超出的部分应该收拢在一起形成一个直径为 0.4m 的扁平线圈, 并放置在接地参考平面上方 0.1m 处。受试设备和耦合装置之间的距离应不大于 1m。

3) 试验电压耦合到被试设备的方法:

a. 交/直流主电源的耦合/去耦网络。采用此网络可以使试验电压能在非对称的状态下施加到受试设备的电源输入端。如果线路上的电流大于耦合/去耦网络规定的电流容量, 即大于 100A, 应经过一个 33nF 的耦合电容把试验电压施加到受试设备上。

b. 对 I/O 和通信端口的试验。为了把试验电压耦合到线路上, 应尽可能地使用容性耦合夹。但是, 如果因为电缆敷设中机械方面的问题而不能使用耦合夹时, 可代之以金属

带或导电箔。不允许把试验电压施加到同轴电缆或屏蔽通信线路的接头 (带电线) 上。

c. 对供电电源端子和保护接地端子的试验。试验电压应该施加在接地参考平面和每一个交流或直流供电电源的接地端子之间, 以及受试设备机壳的保护接地或功能接地端子上。接地参考平面应与电源插座处的保护导线连接。

d. 对每一极性 (正/负) 进行试验, 试验的持续时间不少于 1min。

4) 试验结果的评定: 应符合表 6.2-24 的规定。

11.3.3 静电放电

以下规定了电气和电子设备对来自操作者和邻近物体的静电放电时的抗扰度要求试验等级和试验方法。

(1) 试验设备。静电放电发生器, 其主要部件包括: 充电电阻、储能电容器、放电电阻、电压指示器、放电开关、可更换的电极头、放电回路电缆、电源装置。

静电放电发生器的特性见表 6.2-31。

表 6.2-31 静电放电发生器特性

项 目	特 性
储能电容 ($C_r + C_d$)	150pF±15pF
放电电阻 (R_d)	330Ω±33Ω
充电电阻 (R_c)	50~100mΩ
输出电压 ^①	接触放电 8kV (标称值); 空气放电 15kV (标称值)
输出电压示值的容许偏差	±5%
输出电压极性	正和负极性
保持时间	至少 5s
放电操作方式 ^②	单次放电 (连续放电之间的时间至少 1s)
放电电流波形	见图 6.2-23

① 在储能电容器上测得的开路电压。

② 仅为了探测的目的, 发生器应能以至少 20 次/s 的重复频率进行放电。

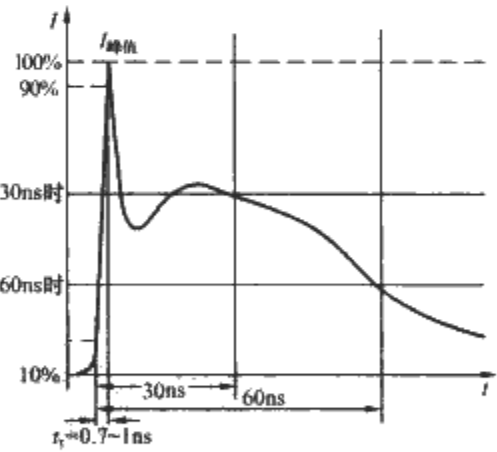


图 6.2-23 静电发生器输出电流典型波形

(2) 试验等级。静电放电有两种形式: ①对导电表面和耦合平面的接触放电; ②在绝缘表面上的空气放电。

接触放电是优先选择的试验方法。试验优先采用表 6.2-32 规定的试验等级范围, 试验等级选择的导则见表 6.2-33。

表 6.2-32 试 验 等 级

等级	Ia 接触放电 试验电压 (kV)	Ib 空气放电 试验电压 (kV)
1	2	2
2	4	4

续表

等级	Ia 接触放电	Ib 空气放电
	试验电压 (kV)	试验电压 (kV)
3	6	8
4	8	15
× ^①	特殊	特殊

① ×表示一个开放等级,在专用设备技术规范中必须对这个级别加以规定,如果规定了高于表格中的电压,则可能需要专用的试验设备。

表 6.2-33 试验等级选择的导则

级别	相对湿度 (%)	抗静电材料	合成材料	最大电压 (kV)
1	35	×		2
2	10	×		4
3	50		×	8
4	10		×	16

- (3) 受试设备的放置:
- 1) 应放置在接地参考平面上(接地参考平面采用铜或铝金属板时其厚度不小于 0.25mm,采用其他金属材料其厚度至少为 0.65mm),并用厚度 0.1m±0.01m 的绝缘支座与之隔开。
- 2) 接地参考平面的最小尺寸为 1m×1m,各边至少应比受试设备超出 0.5m。受试设备距离导电结构(例如屏蔽室的墙壁)应大于 1m。接地电缆与参考平板和所有搭接处的连接阻抗应很低,高频率应用时应采用夹紧装置。
- 3) 若受试设备为台式设备,应放置在接地参考平面上方 0.8m 高的木桌。
- 4) 若受试设备为落地式设备,受试设备与电缆用厚度大约 0.1m 的绝缘支架与接地参考平面隔开。
- 5) 静电放电发生器的放电回路电缆应与接地参考面连接,该电缆的总长度一般为 2m。如果电缆的长度超过 2m,应将多余的长度以无感方式离开接地参考平面放置,且试验配置的其他导电部分保持不小于 0.2m 的距离。放电开关应尽可能靠近放电电极安装。
- 6) 设备和系统应在其最终完毕条件下进行试验。为了便于放电回路电缆的连接,接地参考平面与受试设备应保持约 0.1m 的距离。参考平面采用宽度为 0.3m、长度为 2m、厚度为 0.25mm 的铜或铝板,若使用其他金属材料,最小厚度为 0.65mm。
- (4) 对受试设备直接施加的放电:
- 1) 静电放电施加于受试设备可能接触的点和表面上。在接触放电的情况下,放电电极的顶端应在操作放电开关之前接触受试设备。接触放电电极见图 6.2-24 (b)。
- 2) 试验应以单次放电的方式进行。在预选点上,至少施加 10 次单次放电。连续单次放电之间的时间间隔至少 1s,但为了确定系统是否会发生故障,可能需要较长的时间间隔。
- 3) 静电发生器应保持与实施放电的表面垂直,以改善试验结果的可重复性。
- 4) 在实施放电的时候,发生器的放电回路电缆与受试设备的距离至少应保持 0.2m。
- 5) 对于表面涂漆的情况下,如果漆膜不为绝缘层,则发生器的电极头应穿入漆膜,以便与导电层接触。
- (5) 间接施加的放电。对放置与(或)安装在受试设备

- 附近的物体的放电,应用静电放电发生器对参考接地平板接触放电的方式进行模拟。
- 除满足(4)条规定外,还应满足下列要求:
- 1) 静电发生器放在距被试设备 0.1m 处,放电电极指向参考接地平板。
- 2) 在被试设备的每个可接触到的平面上对参考接地平板至少应进行 10 次单独快速放电。
- (6) 空气放电。如果漆膜为绝缘层,则只进行空气放电。试验时,放电电极的圆形放电头应尽可能接近并触及受试设备(不要造成机械损伤)。每次放电之后,应将静电放电发生器的放电电极从受试设备移开,然后重新触发发生器,进行新的单次放电,直至放电完成。在空气放电试验的情况下,用作接触放电的放电开关应当闭合。空气放电电极头见图 6.2-24 (a)。
- (7) 试验结果及判定:符合表 6.2-24 的规定为合格。
-
- 图 6.2-24 静电放电发生器的放电电极
(a) 空气放电; (b) 接触放电
- 11.3.4 射频电磁场辐射
- 施射射频电磁场辐射取决于发射机的功率及其与设备间的距离。为此,对电子设备的电磁辐射抗扰度试验规定了试验等级和必要的试验方法。
- (1) 试验设备。基本包括:①试验室(产生均匀场);②带放大器的信号源;③天线;④测量设备。
- 目前推荐采用场均匀性较好的一种试验室,即电波暗室。
- 1) 电波暗室:对于受试设备应有足够空间的均匀场域,局部安装一些吸收材料可以使室内的反射减弱。
- 2) 电磁干扰(EMI)滤波器:应注意确保滤波器在连接线路上不致引起谐振效应。
- 3) 射频信号发生器:能覆盖整个频率范围,并应能被 1kHz 的正弦波进行幅度调制,调幅深度 80%。应具有 0.005 慢于 1.5×10^{-3} 十倍频程/s 的自动扫描功能。
- 4) 功率放大器:放大信号(调制的或未调制的)并提供天线输出所需的场强电平。放大器产生的谐波和失真电平应比载波电平至少低 15dB。
- 5) 发射天线:能够满足频率特性要求,如双锥形(20~300MHz)、对数周期(80~1000MHz)或其他线性极化天线系统要求。
- 垂直和水平极化或各向同性场强监视天线,采用总长度为 0.1m 或更短的偶极子,其置于被测场强中的前置增益和光电转换装置具有足够的抗扰度,另配有一根与室外指示器

- 相连的光纤电缆，还需采用充分滤波的信号连接。
- 6) 垂直和水平极化或各向同性场强监视天线。
- 7) 记录功率电平辅助设备：用于记录试验规定场强所需的功率电平和控制产生试验场强的电平。应注意确保辅助设备具有充分的抗扰度。
- (2) 试验程序：
- 1) 试验等级。频率范围为 80~1000MHz，试验等级见表 6.2-34。

表 6.2-34 试验等级			
等 级	试验场强 (V/m)	等 级	试验场强 (V/m)
1	1	3	10
2	3	×	特定

注 ×表示一个开放等级。

表 6.2-35 给出了未调制信号的场强。作为试验设备，要用 1kHz 的正弦波对未调制信号进行 80% 的幅度调制来模拟实际情况。

表 6.2-35 选择试验等级的一般性原则		
等级	辐射环境	受试设备使用场所
1	低电平电磁辐射	1km 以外的当地无线电广播或电视台产生的场以及小功率无线电收发机产生的场
2	中等电磁辐射	离设备相对较近但不小于 1m 的便携式无线电收发机产生的场
3	严酷电磁辐射	离设备很近的大功率无线电收发机产生的场
×	极其严酷电磁辐射	开放等级，该等级由用户和制造厂商定

- 2) 受试设备的放置。试验应尽可能在受试设备的实际工作状态下进行，布线应按生产厂推荐的规程进行，装置应置于机壳内，所有盖子和观察板均应安放就位。当需要某种装置支撑受试设备时，应该选用不导电的非金属材料制作。但设备的机箱或外壳的接地应符合生产厂的安装条件。
- 当受试设备由台式和落地式部件组成时，要保持正确的相对位置。典型受试设备的布置如下：
- a. 台式设备的布置。受试设备应放置在一个 0.8m 高的绝缘试验台上。
- 注：使用非导体支撑物可防止受试设备的偶然接地和场的畸变。为了保证不出现场的畸变，支撑体采用非导体，而不是绝缘层包裹的金属支架。
- b. 落地式设备的布置。落地式设备应置于高出地面 0.1m 的非导体支撑物上，而不是绝缘层包裹的金属构架上。如果受试设备质量轻且体积小，可以放在 0.8m 高的平台上进行试验。但这种方法与标准试验方法的差别应在试验报告中说明。
- c. 布线。如果对受试设备的进、出线没有规定，则使用非屏蔽平行导线。
- 从受试设备引出的连线暴露在电磁场中距离为 1m。
- 受试设备壳体之间的布线按下列规定：
- a) 使用生产厂规定的导线类型和连接器。
- b) 如果生产厂规定导线长度不大于 3m，则按生产厂规定长度用线，导线捆扎成 1m 长的感应较小的线束。

- c) 如果生产厂规定导线长度大于 3m 或无规定，则受辐射的线长为 1m，其余长度为去耦部分，比如套上射频损耗铁氧体管。
- d. 屏蔽室。被试设备放在屏蔽室的木桌上。然后根据相应的安装说明接上电源线和信号线。试验前，应用场探头在校准方格某一节点上检验所建立的场强强度，产生场的天线和电缆位置应与校准时一致，测量达到校准场强所需的正向功率与校准均匀域时记录一致。双锥和对数周期天线放置在距被试设备 1m 处，用频率 1kHz 的正弦波对信号进行 80% 的幅度调制后，在 80~1000MHz 频率范围内进行扫描测量。
- e. 发射天线应对受试设备的 4 个面之每一侧面进行试验。对于双锥形发射天线，要在受试设备的每一侧面进行两种极化状态试验，一次在天线垂直极化位置，一次在天线水平极化位置。对数周期天线产生的是圆形极化场，则不必改变天线的位置。
- f. 带状线电路。对尺寸数量级为 0.3m×0.3m×0.3m 的小型受试设备进行试验时，由于产生横向辐射，受试设备应在 TEM 小室里转动，以便在水平和垂直极化方向上进行实验。
- 可以采用射频吸波材料来提高场的均匀性和减小外部场，而带状线和其他反射物体之间至少保持 2m 的距离。
- 只有当均匀性的要求得到满足，并且受试设备的导线可以按照本标准的要求进行布置时，才能使用带状线和 TEM 小室。
- g. 试验报告中应包括：①受试设备的尺寸；②类型和运行条件；③受试设备放置的高度；④发射天线的位置；⑤扫描速率，驻留时间和频率步长；⑥适用的试验等级；⑦受试设备是台式还是落地式；⑧互连线的类型与数量及接口；⑨受试设备操作方法的描述。
- 3) 试验结果的评定：应符合表 6.2-24 的规定。

11.4 发射

发射是检验电子、电气设备对来自 0.15~30.0MHz 频率范围内电网端扰动电压的极限值的抗扰度的试验方法。

11.4.1 试验设备

(1) 常用频谱分析仪来评估高频扰动。如果频谱分析仪不完全符合 CISPR16—1 的要求，若前端灵敏性欠佳，就可能出现交叉调制，使读数不正确。如不具有正确的带宽，也会产生误差，所以要按 CISPR 标准要求采用一种专用检测器的接收机，即准峰值检测器和平均值检测器。准峰值检测器也称为 CISPR 检测器，它具有较大的过载能力。

(2) 为了对电网端子的扰动（传导性发射）进行测量，接收机覆盖的频率范围为 150kHz~30MHz。准峰值和平均值检测器都可采用。带宽应为 9kHz。

某些接收机的频率范围可达 9~150kHz，在这种频率范围内采用准峰值检测器，带宽应为 200kHz。

电磁辐射（辐射性发射）测量所用的接收机覆盖的频率范围应为 30~1000MHz。这时带宽为 120kHz，应采用准峰值检测器。

11.4.2 试验程序

(1) 阻抗/模拟电网（AMN）。由于电子设备中的高频扰动源有一个源阻抗，所以扰动电压的测量受电网阻抗的影响。应采用 AMN 模拟电网使电源阻抗标准化，这有助于改善不同试验场地间的重现性。在本试验方法所规定的扰动电压测量频率范围内，可采用 50Ω//50μH+5Ω 的电网。在频

率 150kHz~300MHz 之间时, 电子设备可视为一个由 50μH 电感并联 50Ω 接地阻抗的装置, 与进线电网的阻抗无关。

AMN 含有复现每相的电路。中性点 (若采用的话) 通过与每相所用的相同电路连接。

(2) 高阻抗的探针。当电源电压大于 400V 时, 要在市场上买到 AMN 的阻抗是很困难的。当不能采用模拟电网的电路时, 扰动电压可以采用高阻抗的探针来测量。由于工频电流不通过探针, 所以它甚至可与最大电流额定值的电子设备连用。通过调节电容器的电容量和电压额定值, 这种探针可与 1000V 以下的电源一起使用。若将电容器的电容量减小, 在校准时应考虑对测量精度的影响。

探针连接在电源线和基准接地之间。若电子设备采用接地的金属机架, 则机架可被看作是基准的参考接地, 探针应接于电子设备的电源引线上。到探针的连线应尽可能短, 最好小于 0.5m。使被试导体和基准接地之间形成的回路区减至最小。反之该回路会减弱对磁场的灵敏度。

考虑到主电路中无源电容、电阻或电感元件的影响, 主电路和控制电路出故障的原因通常与电压值而不是电流值相关, 所以可以使用轻载试验 (即电动机空载运行试验) 检验电子设备的电磁兼容性。试验时, 也可以采用无源电阻器和电感来模拟电动机的负载条件。特别提出的是, 电动机的外壳可以充当天线。

11.4.3 试验结果判定

EMC 环境应符合相关产品标准或一般的 EMC 标准的要求和规定。

12 封闭式低压成套设备在内部故障引起电弧情况下的试验

12.1 适用范围

本试验方法适用于按 GB 7251.1 制造的封闭式低压成套开关设备和控制设备的燃弧试验, 该试验根据制造商和用户之间的协议而定。该试验不作为型式试验项目。

12.2 名词定义

12.2.1 电弧情况下允许预期电流

由制造商给出一个值, 该值为进线单元端子上的预期短路电流最大允许值, 它与相应的允许电弧持续时间一起来满足该试验规定的要求。

12.2.2 允许电弧持续时间

由制造商给出一个最大允许电弧持续时间值, 它与在电弧情况下相应的允许预期电流值一起来满足该试验规定的要求。成套设备的不同部件可有不同的值。

12.2.3 电弧情况下允许限制短路电流

由制造商给出一个电流值, 该值为用一个限流开关器件保护成套设备的最大允许预期电流值, 以满足该试验规定的要求。该值是电流交流分量的方均根值。相应的功率因数和峰值在 GB 7251.1—2005 的 7.5.3 中给出。

为保护成套设备, 制造商必须给出限流器件 (如限流断路器或熔断器) 的特性 (电流额定值、分断能力、截断电流、 I^2t 等)。

12.3 试验安排

12.3.1 概述

- (1) 试验应在有代表性的样机上进行。
- (2) 试验应在预先没进行过电弧试验的样机上或在一台

相应干净并准备好的样机上进行。

(3) 安装条件应尽可能接近正常使用条件, 一般不需要任何安装成套设备的房间模型。

(4) 样机应完全装配好, 允许内部元件使用模拟品, 只要它们有相同的体积并且不会影响试验。

(5) 规定的人身防护措施应有效。

(6) 电弧试验应按正常使用条件, 进行三相试验。

12.3.2 电压

试验电路施加的电压应至少等于成套设备的最高额定电压, 误差为 +5%。

12.3.3 电流

试验电流应由制造商规定, 它可低于额定短时耐受电流。

(1) 预期短路电流值应由校准波形图检验。检验试验电流的阻抗在试验期间内应相同。

(2) 如果内部试验的额定电流定为额定限制短路电流, 为了校准, 短路点应放在指定的保护器件的进线侧, 并尽可能靠近该器件。短路点应尽可能靠近成套设备进线端。

12.3.4 频率

当额定频率为 50Hz 或 60Hz 时, 试验开始时的频率应在 48~62Hz 之间。在其他额定频率时, 其偏差应在额定值的 ±10% 内。

12.3.5 试验持续时间

试验时成套设备的通电持续时间由制造商给出。根据保护器件的动作时间进行选择, 如果不了解这些保护器件的详细资料, 则通电持续时间至少为 0.1s。通常这个持续时间应不超过 0.5s。

当成套设备从变压器馈电时, 其进线开关器件的允许电弧持续时间一般应为 0.3s, 以便于高压保护设备的运行。

12.4 试验程序

12.4.1 电源电路

试验样机的连接和供电应与正常使用时一样, 如果向多于一个方向馈送电源, 应选择可能产生应力最大的馈电方向。

12.4.2 电弧引燃

电弧应在不接地的相间引燃, 用一个裸铜引燃线以最短距离与临近导体连接, 三相相连。

对于不同试验电流, 应使用表 6.2-36 所规定尺寸的铜引燃线。

表 6.2-36 试验电流与铜引燃线尺寸	
试验电流 i (kA)	导线截面积 (mm ²)
$i \leq 25$	0.75
$25 > i \leq 40$	1.0
$i > 40$	1.5

如果试验电流受限流保护器件影响, 引燃线应根据该器件的允通电流在表 6.2-36 中选择。引燃点应选择在生成的电弧效应能在成套设备内产生最大应力的点。

引燃导线仅应连接到可接近的裸导体上。当引燃线连接时, 导体上的绝缘盖板或套管不应被损坏、移去或穿孔。所有导体都被绝缘的任何隔室不需要试验。

电弧不能用穿过固体绝缘材料的方法引燃。

12.4.3 重复试验

关于第一次试验, 如果试验期间电弧在整个试验维持时

间不到一半时熄灭并没有再引燃，则试验应在同一引燃点上重复。如仍不能达到持续时间，不需进一步重复试验。

12.4.4 指示器（用于观察气体的热效应）

指示器采用尺寸大约为 150mm×150mm 的黑色棉布（棉布质量约为 150g/m²）。

指示器应垂直固定在操作人员容易接近的成套设备所有

面附近，应放在最高 2m，与成套设备相距 30cm±1.5cm 的地方，面朝气体可能喷发出的所有点（如接合处、检测窗、门）。

指示器应固定在钢板制成的框架上，安放时不能让它们的剪切边朝向试验单元，还要注意保证它们之间不能相互引燃。

第 3 章 低压成套开关设备试验

1 简述

本章所述的试验方法、检测技术主要是用于低压成套开关设备和控制设备的试验，包括低压抽出式成套开关设备、低压固定面板式成套开关设备、低压固定封闭式成套开关设备、母线干线系统、配电板、建筑工地用成套开关设备、电缆分线箱。基本上能满足目前低压成套开关设备和控制设备的检测要求。主要依据包括：IEC 60439—1 Low-voltage switchgear and controlgear assemblies—Part 1: Type-tested and partially type-tested assemblies；GB 7251.1—2005《低压成套开关设备和控制设备 第一部分：型式试验和部分型式试验成套设备》；GB/T 7251.8《低压成套开关设备和控制设备智能型成套设备通用技术要求》；JB/T 9661《低压抽出式成套开关设备》；JB/T 10328《低压固定面板式成套开关设备》；JB/T 5877《低压固定封闭式成套开关设备》。

2 型式试验项目

温升试验、介电性能试验、短路耐受强度试验、保护电路有效性检测、电气间隙和爬电距离测量、机械操作试验、防护等级试验、EMC 试验、成套设备中电器和独立元件的试验、功能测试。

3 试验方法

装置的短路耐受强度试验、EMC 试验、成套设备中电器和独立元件的试验、功能测试的试验方法见第 2 章。

3.1 短路耐受强度试验

3.1.1 可免除短路耐受强度验证的成套设备的电路

(1) 额定短时耐受电流或额定限制短路电流不超过 10kA 的成套设备。

(2) 采用限流器件保护的成套设备，该器件在最大允许预期短路电流（在成套设备的进线电路端）时的截断电流不超过 17kA。

(3) 成套设备中与变压器相连接的辅助电路：变压器二次额定电压不小于 110V 时，其额定容量不超过 10kVA；二次额定电压小于 110V 时，其额定容量不超过 1.6kVA，而且其短路阻抗不小于 4%。

(4) 成套设备的所有部件（母排、母线支架、母排接头、进线和出线单元、开关器件等）已经过适合成套设备工作条件的型式试验。

以开关器件为例，符合 GB 14048.3《具有额定限制短路电流的开关装置》或符合 GB 14048.4《具有短路保护器件的电机起动类装置》等。

3.1.2 短路耐受强度试验

见第 2 章。

3.2 EMC 试验

3.2.1 EMC 环境

在没有专门协议^①的情况下，对属于 GB 7251.1 标准范围的成套设备，要考虑下面的两种环境条件：

环境 1：主要与低压公共电网有关，例如在居民区、商业区和轻工业区安装使用。本环境不包括强干扰源，如弧焊机。

环境 2：主要与低压非公共电网或工业电网有关，包括强干扰源。

3.2.2 试验要求

在多数情况下，成套设备一经生产或组装，就或多或少包含了任意组装的电器和元件。

如果满足了下述条件，则不要求在最终的成套设备上进行 EMC 抗干扰或辐射试验：

(1) 按第 2 章 11.1.2 中规定的环境进行设计的组合器件和元件符合相关的产品标准或通用的 EMC 标准。

(2) 内部安装及接线是按照元器件制造商的说明书进行的（关于互相影响、电缆屏蔽和接地等方面的安排）。否则，要按照第 2 章 11.3 和 11.4 的试验要求验证 EMC。

3.2.3 抗干扰试验

(1) 不装有电子电路的成套设备。此种成套设备不受正常电磁干扰，因此不需进行抗干扰试验。

(2) 装有电子装置的成套设备。安装在成套设备内的电子装置应符合相关的产品标准或通用的 EMC 标准，并适于规定的 EMC 环境。

注意：一条简单的整流电路对一般的电磁干扰不敏感，因此不需要进行抗干扰试验。

(3) 必须用试验验证抗干扰性，见表 6.3-1。

表 6.3-1 验证抗干扰性试验

试验项目	所据标准	试验方法	要求的试验级别
浪涌 1.2/50~8/20μs	GB/T 17626.5	试验方法见第 2 章 11.3.1	2kV（线—地），1kV（线—线）
快速瞬态冲击	GB/T 17626.4	试验方法见第 2 章 11.3.2	2kV
电磁场	GB/T 17626.3	试验方法见第 2 章 11.3.4	10V/m
静态放电	GB/T 17626.2	试验方法见第 2 章 11.3.3	8kV/空气放电

3.2.4 辐射试验

(1) 不装有电子电路的成套设备。该种成套设备只在偶然的通断操作过程中可能产生电磁干扰。尽管如此，它应被限制在开关过电压以内，其持续时间以微秒为单位测量，其值不超过相关电路的额定脉冲耐受电压。辐射的频率、等级及后果被视为低压装置的正常电磁环境部分，因此可以认为

① 专门协议：指合适的措施，即用来防止除电磁兼容性（EMC）以外的传导和辐射干扰，并且防止除第 2 章 11.1.2 所述环境以外的 EMC 干扰。

满足了电磁辐射的要求,不需进行试验。

(2) 装有电子电路的成套设备,例如斩波电源、包含带高频计时器的微信息处理器的电路,可能出现持续的电磁干扰。装有电子电路的独立装置和元器件应符合相关产品标准或一般的 EMC 标准的要求和规定的 EMC 环境。

(3) 辐射极限应按照下述标准验证:

- 1) CISPR 11 B 级用于环境 1。
- 2) CISPR 11 A 级用于环境 2。

其中:A 级(A 类设备)指非家用和不直接连接到住宅低压供电网设施中使用的设备;B 级(B 类设备)指家用设备和直接连接到住宅低压供电网设施中使用的设备。

试验方法见第 2 章的 11.4。

3.3 成套设备中电器和独立元件的试验

如果成套设备中的电器和独立元件已按标准要求做过型式试验,按照 GB 7251.1 中 7.6.1 进行过挑选,并且按照制造商的说明书进行安装,则不要求进行型式试验,否则应按其产品标准做型式试验。例如:塑壳断路器应按 GB 14048.2 做型式试验;电抗器按 GB 10229 做型式试验;干

式电力变压器按 GB 6450 做型式试验。

3.4 功能测试

一般情况下,在温升试验中进行系统功能测试。

首先连接好系统所有的控制设备。在温升试验之前以及进行之中应通过上位机进行系统操作。温升稳定之后,测试系统的通信方式、遥调功能、遥测功能、遥控功能、遥信功能、实时控制功能。通过上位机的参数及功能记录应包括以下方面:

- 1) 设定任意一路进出线框架断路器的保护特性参数:任意设定一路电机控制回路的保护参数,如电机过载倍数(或实际电流值)、电机起动控制方式(试验条件允许时)。
- 2) 通过上位机对试验回路进行试验操作。
- 3) 包含有软起动器、调速器的系统控制器应带电机进行起动、停车、正常运行的试验。
- 4) 试验中记录任意两个回路的电流、电压值。
- 5) 其他制造商产品中提供的功能要求。

以上参数记录或功能应与柜体上仪表或开关显示的参数或功能一致,有一项不符合可判定为产品功能不合格。

第4章 母线干线系统试验(母线槽)

1 简述

本章所述的试验方法、检测技术主要用于母线干线系统的试验,包括密集型母线槽、高强封闭式母线槽、空气绝缘母线槽、照明母线槽、耐火母线槽等母线干线系统试验,包含了母线干线系统的主要试验及检测。主要依据包括:IEC 60439—2 low-voltage switchgear and controlgear assembly-Part 2: Particular requirements for busbar trunking system (busway), GB 7251.2《低压成套开关设备和控制设备 第2部分:对母线干线系统(母线槽)的特殊要求》;JB/T 8511《空气绝缘母线干线系统(空气绝缘母线槽)》,JB/T 9662《密集绝缘母线干线系统(密集绝缘母线槽)》,JB/T 10327《耐火母线干线系统(耐火母线槽)》等国际标准、国家标准、行业标准,也可以依据企业标准。

2 型式试验项目

温升试验、介电性能试验、短路耐受强度试验、保护电路有效性检测、电气间隙和爬电距离测量、机械操作试验、防护等级试验、母线干线系统电气性能的试验、结构强度的试验、滑触式干线系统耐久性的试验、耐压力性能试验、绝缘材料耐受非正常发热试验、防止火焰蔓延的试验、建筑结构中防火挡板的试验。

3 试验方法

装置的介电性能试验、电气间隙和爬电距离测量、机械操作试验、防护等级试验的试验方法见第2章。

3.1 温升试验

3.1.1 试验设备

试验设备见第2章。

3.1.2 试验方法

(1) 母线干线系统的放置。母线干线系统进行试验时,应如同正常使用时一样放置,所有覆板等都应就位。按正常工作的安装放置形式进行额定电流温升试验,如果试验只做一次,应采用最不利的安装放置形式。

(2) 温升试验:

1) 母线干线单元。试验时,将直线形母线干线单元连接在一起,总长度至少为6m,并包括两个连接点。应将母线干线水平支撑于离地面大约1m的位置上。

试验时,应防止无意产生的流动空气进入母线干线通道,如将干线端头封闭。

试验应进行足够的时间(但不超过8h),使温升达到一个恒定值。实际上,温升变化不超过1K/h即达到了此条件。

导体和外壳相关部件的温升应进行检查和记录,方法是将热电偶放在每条母线干线单元的邻近接口处,并在距离外壳纵向边大约1m的地方。靠近母线干线中心部位的环境温度要记录在试验报告中,温升示意图见图6.4-1。

试验要符合制造商规定的母线干线其他安装条件,如果一条母线干线系统可以在不同的安装条件下使用(例如:导

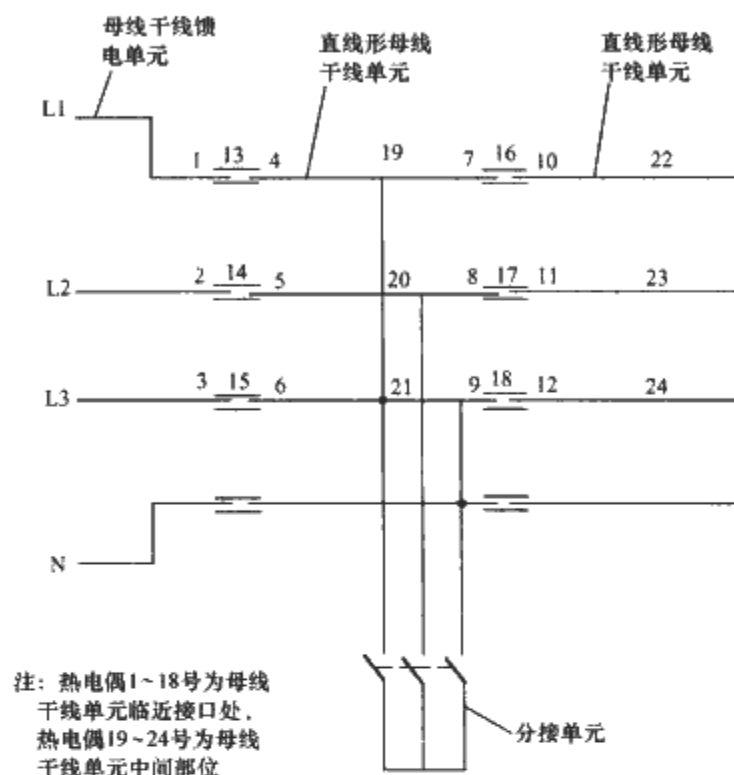


图 6.4-1 温升示意图

体方位的改变,母线干线垂直放置),制造商应给出相应的安装系数 k_2 (如果有的话),以确定系统最后允许电流 $I = k_1 \times k_2 \times I_N$,其中 k_1 (35℃时 $k_1 = 1$)、 k_2 为安装系数。

2) 分接单元:试验时,分接单元应载有其规定的额定电流,而且应向母线干线分接位置供给其额定电流 I_N ,分接单元应尽可能放在母线干线系统的中部。导体和外壳相关部件的温升应进行检测和记录。

所连接元件的温升(例如:保护器件,电子仪器等)应符合相关的标准。

注意:带有熔断器或熔断器组合开关的分接单元按照GB/T 13539用具有相等功率损耗的熔断器和熔丝进行试验,并记录在试验报告中。带熔丝分接单元的额定电流根据分接单元熔丝的最大电流值给出。

对于包含一个断路器的分接单元,其额定电流由母线干线制造商按照断路器制造商给出的数据和分接单元的设计(例如:分接单元外壳的尺寸)给出。

3.1.3 试验结果判定

除非另有规定,对于正常工作时可接近但不需接触的母线干线系统的外壳,金属表面允许其温升限值提高25K,绝缘表面允许其温升限值提高15K,其他见第2章。

3.2 短路耐受强度试验

3.2.1 试验设备

试验设备见第2章。

3.2.2 试验方法

(1) 可免除此项试验的成套设备电路包括:

1) 打算与变压器相连接的成套设备中的辅助电路:该变压器二次额定电压不小于110V时,其额定容量不超过10kVA;或二次额定电压小于110V时,其额定容量不超过1.6kVA,而且其短路阻抗不小于4%。

2) 设备的所有部件 (母排、开关器件等) 已经过适合成套设备工作条件的型式试验。

除以上两种情况外, 均应进行短路耐受强度验证。

(2) 试验安排。母线干线系统应像正常使用一样安置。该成套设备至少包括一个母线干线馈电单元, 并且与适当数量的直线形母线干线单元相连接, 其总长度不超过 6m, 至少有一个连接点。没有包括在上述试验中的系统元件应分别进行试验, 按使用情况组装。其他见第 2 章。

3.2.3 试验结果判定

试验后, 导体不应有任何过大的变形, 而且变形不影响与分接单元的恰当连接。其他见第 2 章。

3.3 保护电路有效性检测

3.3.1 试验设备

试验设备见第 2 章。

3.3.2 试验方法

保护电路有效性测试部位包括:

- (1) 直线段: 上下盖板一地; 左右侧板一地; 母线槽上任意固定螺钉一地; 母线槽连接螺钉一地。
- (2) 分接单元: 操作手柄一相, 开关支架一地等。

3.4 母线干线系统电气性能的试验

3.4.1 试验设备

试验设备为钳式用电状况检测记录仪。

3.4.2 试验方法

(1) 确定系统的电阻、电抗与阻抗的平均值。按图 6.4-2 进行试验, 在温升试验后测量相一相的电压及额定电流, 计算系统的电阻 R 、电抗 X_1 、阻抗 Z 及 20℃ 时的电阻值 R_{20} 。

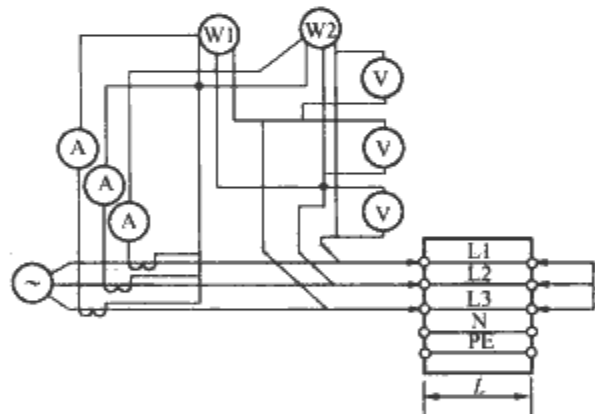


图 6.4-2 三相交流系统电阻、电抗的平均值试验

注: 图上用两个有功功率表确定总的三相有功功率, 但也可用有功功率表的其他形式确定, 如三相或单相。

根据测量数据计算公式如下:

1) U , 即相-相电压降方均根值 (V), 计算公式为

$$U = \frac{U_{12} + U_{23} + U_{31}}{3} \quad (6.4-1)$$

2) I , 即额定电流方均根值 (A), 计算公式为

$$I = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \quad (6.4-2)$$

3) P , 总的三相有功功率 (W)。

4) L , 母线干线长度 (从连接电压表导线的输入端到连接母线的输出端) (m)。

5) 计算相-中性点的电抗 Z (Ω/m)、交流电阻 R (Ω/m) 和电抗 X_1 (Ω/m), 公式如下

$$Z = \frac{U}{\sqrt{3}IL} \quad (6.4-3)$$

$$R = \frac{P}{3I^2L} \quad (6.4-4)$$

$$X_1 = (Z^2 - R^2)^{\frac{1}{2}} \quad (6.4-5)$$

然后, 计算温度 20℃ 时的 R_{20} , 稳定状态工作温度 θ_1 时的 R_1 和 Z_1 。

$$R_{20} = \frac{\rho_{20}l}{A} \quad (6.4-6)$$

式中: l 为长度, m; ρ_{20} 为 20℃ 时导体的电阻率, 铜为 $0.018 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, 铝为 $0.029 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; A 为截面积, mm^2 。

(2) 确定故障条件下系统的电阻、电抗和阻抗值。适用于额定电流大于 100A 的母线干线系统, 故障条件下的系统电阻、电抗和阻抗值, 是在额定电流 I_N 下确定的, 试验安排同验证直线单元短路耐受强度试验安排一样, 至少包括一个连接点。

下面任一种方法可用作这类故障电流的计算:

1) 对称法:

a. 对称法接线见图 6.4-3。

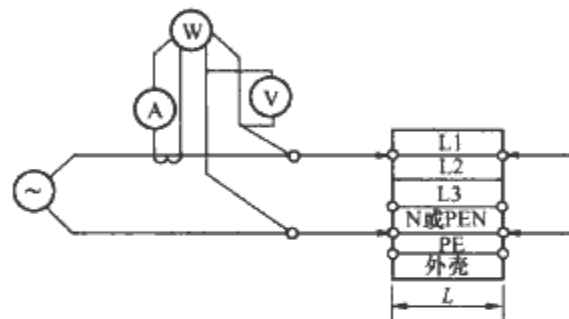


图 6.4-3 试验安排—对称法接线

注意: 根据制造商的说明书, 任何母线金属外壳可能带 PE/PEN。在没有 PE/PEN 导体的情况下, 必须在相导体与金属外壳的 PE 端子间进行测量。应该记录试验时环境温升和导体的最后温升 (从上升到下降并从下降到上升)。三相导体并联连接并在两端短路。

b. 对称法测量与计算以下各量:

U_{xx} , 故障回路单相电压降方均根值 (V); I_{xx} , 母线干线单元单相短时试验电流方均根值 (等于额定电流值的 3 倍) (A); P_{xx} , 单相有功功率; L , 母线干线长度, 从连接电压表导线的输入端到连接母线的输出端 (m)。

注意: 使用短路试验电流 (例如: 小于 30s 的冲击) 是为了防止测量期间带电导体温升过高。各量的下角 xx 取决于故障回路的连接形式。

c. 对称法故障回路连接的每一形式 (见图 6.4-3): ① 相到中性点; ② 相到 PEN; ③ 相到 PE。

相应阻抗 Z_{xx} 、交流电阻 R_{xx} 和电抗 X_{0xx} 的计算如下

$$Z_{xx} = 3 \frac{U_{xx}}{I_{xx}L} \quad (\Omega/m) \quad (6.4-7)$$

$$R_{xx} = 3 \frac{P_{xx}}{I_{xx}^2L} \quad (\Omega/m) \quad (6.4-8)$$

$$X_{0xx} = (Z_{xx}^2 - R_{xx}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (\Omega/m) \quad (6.4-9)$$

然后按式 (6.4-6) 计算温度 20℃ 时的 R_{0xx} , 考虑故障回路阻抗 (适用于电流大于 100A 的母线干线系统) 计算相应的零序阻抗 Z_{0xx} , 即

$$Z_{0xx} = (R_{0xx}^2 + X_{0xx}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (6.4-10)$$

2) 阻抗法:

a. 阻抗法接线见图 6.4-4。

注意: 根据制造商的说明书, 任何母线金属外壳可能带 PE/PEN。在没有 PE/PEN 导体的情况下, 必须在相导体和金属外壳的 PE 端进行测量。试验时环境温升和导体的最后温升 (从上升到下降并从下降到上升) 应该记录下来。

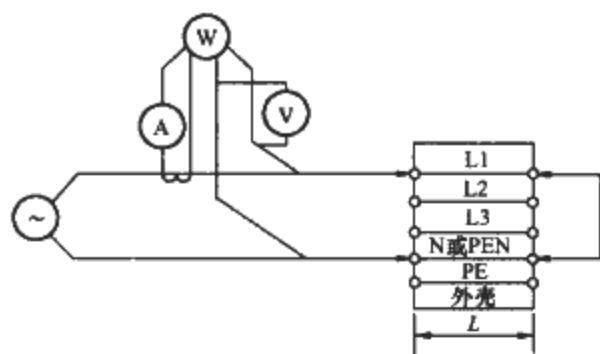


图 6.4-4 试验安排—阻抗法接线

b. 阻抗法测量与计算下列各量：

U_{xx} ，故障回路单相电压降方均根值（V）； I_{xx} ，单相短时试验电流方均根值等于母线干线单元额定电流值的 3 倍（A）； P_{xx} ，单相有功功率； L ，母线干线长度，从连接电压表导线的输入端到连接母线的输出端（m）。

注意：使用短路试验电流（例如：小于 30s 的冲击）是为了防止测量期间带电导体温升过高。 xx 取决于故障回路的连接形式。

c. 阻抗法故障回路连接的每一形式（见图 6.4-4）：

①相到相（ph1 到 ph2，ph2 到 ph3，ph3 到 ph1）；②相到中性点（ph1 到 N，ph2 到 N，ph3 到 N）；③相到 PEN（ph1 到 PEN，ph2 到 PEN，ph3 到 PEN）；④相到 PE（ph1 到 PE，ph2 到 PE，ph3 到 PE）。

相应阻抗 Z_{xx} ，交流电阻 R_{xx} 和电抗 X_{xx} 的计算如下

$$Z_{xx} = \frac{U_{xx}}{I_{xx}L} \quad (\Omega/m) \quad (6.4-11)$$

$$R_{xx} = \frac{P_{xx}}{I_{xx}^2L} \quad (\Omega/m) \quad (6.4-12)$$

d. 计算平均母线干线故障回路值如下：

相到相时

$$R_{bph\ ph} = \frac{R_{ph1\ ph2} + R_{ph2\ ph3} + R_{ph3\ ph1}}{3} \quad (\Omega/m) \quad (6.4-13)$$

$$X_{bph\ ph} = \frac{X_{ph1\ ph2} + X_{ph2\ ph3} + X_{ph3\ ph1}}{3} \quad (\Omega/m) \quad (6.4-14)$$

相到中性点时

$$R_{bph\ N} = \frac{R_{ph1\ N} + R_{ph2\ N} + R_{ph3\ N}}{3} \quad (\Omega/m) \quad (6.4-15)$$

$$X_{bph\ N} = \frac{X_{ph1\ N} + X_{ph2\ N} + X_{ph3\ N}}{3} \quad (\Omega/m) \quad (6.4-16)$$

相到 PEN 时

$$R_{bph\ PEN} = \frac{R_{ph1\ PEN} + R_{ph2\ PEN} + R_{ph3\ PEN}}{3} \quad (\Omega/m) \quad (6.4-17)$$

$$X_{bph\ PEN} = \frac{X_{ph1\ PEN} + X_{ph2\ PEN} + X_{ph3\ PEN}}{3} \quad (\Omega/m) \quad (6.4-18)$$

相到 PE 时

$$R_{bph\ PE} = \frac{R_{ph1\ PE} + R_{ph2\ PE} + R_{ph3\ PE}}{3} \quad (\Omega/m) \quad (6.4-19)$$

$$X_{bph\ PE} = \frac{X_{ph1\ PE} + X_{ph2\ PE} + X_{ph3\ PE}}{3} \quad (\Omega/m) \quad (6.4-20)$$

e. 最后考虑故障回路阻抗，计算温度 20℃ 时的 R_{b0xx} ，

以及母线干线系统的稳定状态工作温度 θ_1 时的 R_{b1xx} 。用下面公式计算

$$R_{b0xx} = R_{bxx} \times \frac{1}{1 + 0.004 \times (\theta_{xx} - 20)} \quad (6.4-21)$$

$$R_{b1xx} = R_{bxx} \times [1 + 0.004 \times (\theta_1 - \theta_{xx})] \quad (6.4-22)$$

注意： θ_{xx} 是考虑了故障回路阻抗所记录的短时额定电流下导体的最后温度； θ_1 是母线干线系统额定电流下的稳定状态工作温度。

3.5 结构强度的试验

3.5.1 试验设备

试验设备为砝码。

3.5.2 试验方法

根据制造商给出的机械负载，水平安装的母线干线系统的结构强度试验应按照下列试验程序进行：①正常机械负载；②重载机械负载；③特殊机械负载。

(1) 正常机械负载的结构强度验证。对于母线干线系统，正常机械负载除包括其本身的质量外，还包括馈电单元和分接单元的机械负载。

注意：所需机械刚度可通过选择材料的厚度、形状来获得和/或通过制造商规定的固定点的数量和位置来获得。由自身单独支架支撑的馈电单元，不包括在正常机械负载中。

1) 第一个试验在一根直线干线单元上进行（见图 6.4-5），该干线像正常使用一样放置两点支撑，两点距离为 D 。 D 应是制造商规定的支撑点间最大距离。支撑的位置和形式必须由制造商规定。

不带动载将一个质量 M 加在一块边宽等于母线干线系统边宽的正方形刚性板上，刚性板放在外壳上部支撑点中间。质量 M 应等于在两支撑点之间干线单元那部分的质量 m 加上附加质量 m_L ，相当于由馈电单元和分接单元施加上的最大负载，馈电单元和分接单元是制造商规定必须连接到长度 D 上的。

试验持续时间应为 5min。

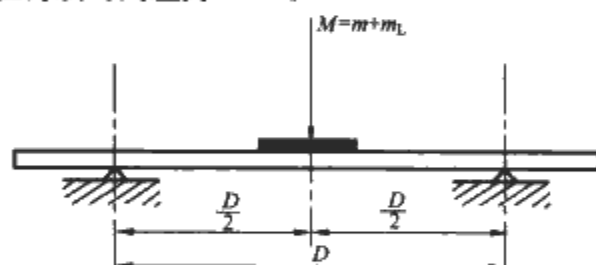


图 6.4-5 第一个试验

m —支撑点间干线单元的质量； m_L —馈电单元和分接单元的质量； $M = m + m_L$

2) 第二个试验应在按正常使用状况支撑的两个连接在一起的直干线单元上进行（见图 6.4-6），它们以最少的支点，最大的距离 D 和 D_1 进行支撑。 D_1 是由制造商规定的靠近接点的两支撑点之间最大距离。连接点应放在两个支撑点中间。

不带动载将质量 M_1 加在一块边宽等于母线干线系统边

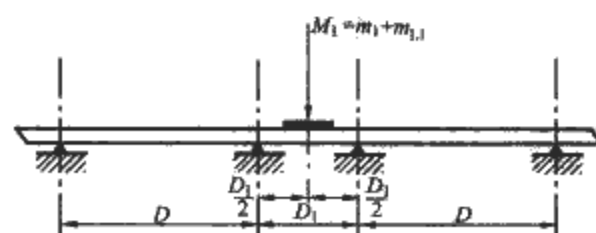


图 6.4-6 第二个试验

m_1 —距离 D_1 两点之间（包括接点）的干线单元的质量； m_{L1} —馈电单元和分接单元的质量； $M_1 = m_1 + m_{L1}$

宽的正方形刚性板上，刚性板放在外壳上部连接处。质量 M_1 等于干线单元两支撑点间距离 D_1 （包括连接点）的质量 m_1 加上附加质量 m_L ， m_L 等于制造商规定连接到长度 D_1 的馈电单元和分接单元的最大负载。

试验持续时间应为 5min。

例：1600A 母线干线 45kg/m 分接单元质量为 15kg，馈电单元为 25kg， $D=2m$ ， $D_1=1.5m$ 。

正常机械负载试验：第一个试验 $M=m+m_L=(45\times 2+15+25)\text{ kg}=130\text{ kg}$

第二个试验 $M_1=m_1+m_{L1}=(45\times 1.5+15+25)\text{ kg}=107.5\text{ kg}$

（2）重载机械负载的结构强度验证。对于母线干线系统，重载机械负载除包括正常机械负载外，还包括如一个人（90kg）的质量这样的额定负载。

注意：所需机械刚度可通过选择材料的厚度、形状来获得和/或通过制造商规定的固定点的数量和位置来获得。本试验不包括可作为行走通道使用的母线干线系统。

例：1600A 母线干线 45kg/m 分接单元质量为 15kg，馈电单元为 25kg， $D=2m$ ， $D_1=1.5m$ 。

重载机械负载试验：第一个试验 $M=m+m_L+90\text{ kg}=(45\times 2+15+25+90)\text{ kg}=220\text{ kg}$

第二个试验 $M_1=m_1+m_{L1}+90\text{ kg}=(45\times 1.5+15+25+90)\text{ kg}=187.5\text{ kg}$

（3）特殊机械负载的结构强度验证。母线干线系统承受其他附加负载的能力（如照明设备、附加电缆、梯子等），应由制造商和用户之间协商确定。

3.5.3 试验结果判定

试验期间和试验后，无论是干线单元还是干线单元连接点或其部件都应无破裂，而且，外壳的变形不应损害防护等级及电气间隙和爬电距离减小到小于规定值。试验后，不应影响进线单元和出线单元正常插入。

试验期间和试验后保护电路应保持其功能。进行每一项试验后，试验装置根据第 2 章进行介电强度试验，无异常现象为合格。

3.6 滑触式干线系统耐久性的试验

3.6.1 试验设备

试验设备为电流表、功率因数表。

3.6.2 试验方法

在额定电压下滑触点通以额定电流时，应能沿着母线干线系统的导体成功地来回移动 10 000 次。

在交流情况下，负载的功率因数应为 0.75~0.8。

带滑动触点触轮的滑动速度和它移动的距离应由所设计的工作条件来确定。如果触轮用来支撑一件工具或其他机械负载，在试验时应加挂一个与其相当的质量。

3.6.3 试验结果判定

试验结束后，在机械和电气上不应存在由于过度锈痕、烧伤或触点的熔焊而引起的损害。

3.7 耐压力性能试验

3.7.1 试验设备

试验设备为砝码。

3.7.2 试验方法

直线形母线干线单元（例如 3m 或更长）应能承受以下压力：①如果指明母线干线用于正常机械负载，至少 4 倍的单元长度质量（千克每米）；②如果指明母线干线用于重载

机械负载，至少 4 倍的单元长度质量（千克每米）加上 90kg。

试验安排：将压力依次沿直线单元施加在 4 个或更多点上，包括相邻的绝缘体之间的一个点（如果有的话）。母线干线单元应水平支撑在一个平面上，并利用一个与母线干线单元同样宽、120mm 长的刚性板将力施加在上面。

试验时间：每点至少持续 5min。

3.7.3 试验结果判定

试验中和试验后，外壳不应有破裂、不应出现明显的永久变形（这里是指可能影响防护等级，但电气间隙和爬电距离不低于规定值、不影响系统进线单元和出线单元正常插入）为合格。

3.8 绝缘材料耐受非正常发热试验

3.8.1 试验设备

试验设备为灼热丝。

3.8.2 试验方法

（1）母线干线系统绝缘材料的部件可能处在热应力作用下，不应受非正常发热的过度影响，其热应力是由电气作用和可能损坏系统安全的变形引起的。用灼热丝试验进行检验，按照表 6.4-1 的规定进行试验。

表 6.4-1 灼热丝的温度、施加时间

绝缘材料部件	灼热丝的温度 (℃)	施加时间 (s)
与导电部件接触，并且必须保持带电部件在其位置上	850±15	30±1
与导电部件接触或不接触，并不需要保持带电部件在其位置上（如外壳、覆板）	650±10	30±1

（2）试验安排。试验仅在一台样品上进行。如有疑问，试验应在另外两台样品上补做。

对于陶瓷材料制作的部件不需进行试验。小的部件，如垫圈，不进行此项试验。

如果规定试验必须在同一部件的一个以上不同部位进行（如壁厚不同），必须加以注意，以保证前面的试验造成的损伤不影响所做试验的结果。

如果可能，样品应该是一个完整的母线干线系统部件。如果试验不能在一个完整的部件上进行，可以从其中取下合适的部分进行试验。在一个部件上的试验被认为能够代表相同材料类似部件的要求。

3.8.3 试验结果判定

如果没有明显的火焰而且没有持续的余辉，或者如果在移开灼热丝 30s 内样品的火焰和余辉熄灭，则认为样品通过了灼热丝试验。

不应出现棉纸燃烧和样品被烧焦的现象。

3.9 防止火焰蔓延的试验

当燃烧源移开后，母线干线系统应无火焰蔓延或点燃后不再继续燃烧。用火焰蔓延试验进行验证。

3.9.1 试验设备

试验设备为燃烧试验室。

3.9.2 试验方法

试验适用于母线干线单元，验证其满足了安装和组装时无火焰蔓延性能。

(1) 试验装置:

1) 试验箱和空气源。试验装置应是一个宽 (1000 ± 100) mm、深 (2000 ± 100) mm 和高 (4000 ± 100) mm 的直立试验箱, 见图 6.4-7, 箱底应高出地面。试验箱的周边通常应密封, 空气从箱底距前墙 (150 ± 10) mm 处打开的一个 (800 ± 20) mm \times (400 ± 10) mm 的进气口流入箱内。

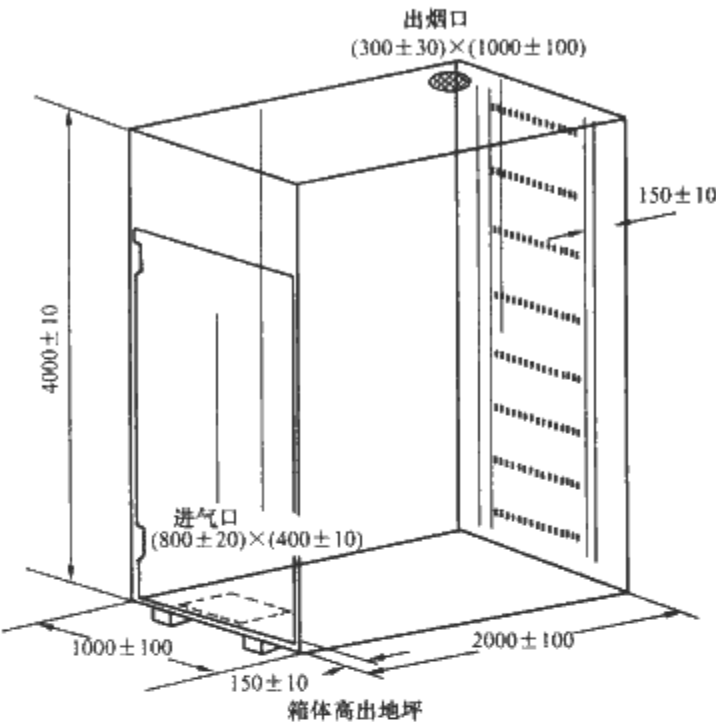


图 6.4-7 燃烧实验室的例子

试验开始之前, 恒定控制温度在 $(20 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 。在出气口或进气口测量空气流量, 并调节为 (5000 ± 500) L/min。试验期间这些参数最好应予调节。

在试验箱顶部的后边开一个 (300 ± 30) mm \times (1000 ± 100) mm 的出气口。试验箱的后墙和两侧墙应采用传热系数约为 $0.7\text{W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K})$ 的热绝缘。例如在 $1.5 \sim 2.0$ mm 厚的钢板上包覆 65 mm 厚的矿物纤维, 再外包一适当的外套即可(见图 6.4-7)。钢梯与试验箱后墙之间的距离为 (150 ± 10) mm、钢梯最下面的横档距地面 (400 ± 5) mm。试样的最低处距地面约 100 mm。

2) 钢梯类型。宽 500 mm 的标准钢梯和宽 800 mm 的宽型钢梯两种类型。

3) 排烟装置。如有必要, 可在试验箱上安装收集和洗涤烟尘的装置。该装置应能收集箱内的烟尘而不致使通过试验箱的空气流量发生变化。

4) 火源。应包括一个或两个丙烷燃气喷灯及其配套流量计和文丘里混合器。其供火表面应为长 341 mm 和宽 30 mm 的扁平金属板, 钻有 242 个直径为 1.32 mm 的孔。这些孔的中心距离为 3.2 mm, 分 3 排交错排列, 每排分别为 81 、 80 和 81 个孔, 分布在标称尺寸 257 mm \times 4.5 mm 范围内(见图 6.4-8)。由于在喷火板上钻孔可以不用钻模, 因此孔的间距可能有细小的偏差。另外, 在喷火板两侧可各开一排小孔, 作用是保证火焰的稳定燃烧。

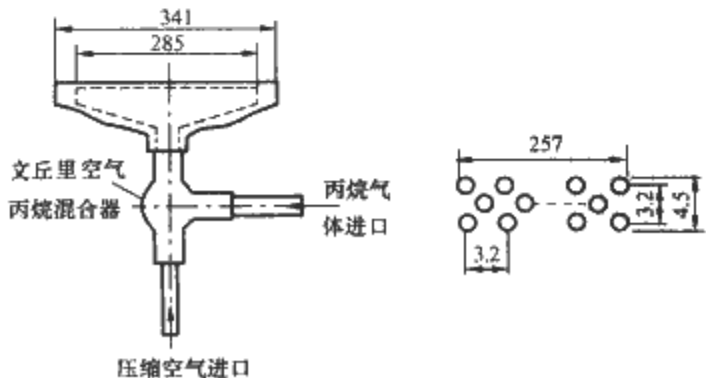


图 6.4-8 火源

每个喷灯应自备精确装置, 以控制燃料和空气流入速率。丙烷转子流量计连接完毕之后, 应用一个流量计检查其刻度, 以保证自备配管和文丘里混合器对它没有影响。

如有必要, 应根据丙烷转子流量计的规定对温度和压力变化进行修正。

用于本试验的空气露点温度不高于 0°C , 流量应为 (76.7 ± 4.7) L/min; 在压力 0.1MPa 和温度 20°C 下的丙烷流量应为 (13.3 ± 0.5) L/min, 以对每个喷灯提供 $(73.7 \pm 1.68)\text{MJ/h}$ ($70\,000\text{Btu/h} \pm 1600\text{Btu/h}$) 的标称热量。

5) 火源位置。喷灯应水平放置, 距试品前表面 (75 ± 8) mm, 见图 6.4-9; 距试验箱底部 (600 ± 5) mm。喷灯供火点位于钢梯两根横档之间的中心, 并且距试样下端 (500 ± 5) mm。

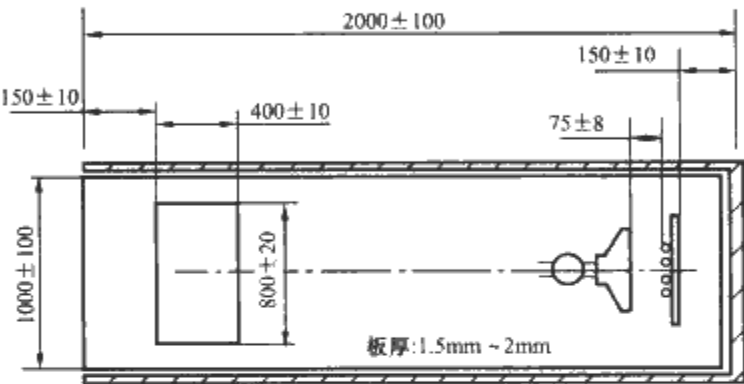


图 6.4-9 燃烧实验室的例子

试验前可以在远离试验位置处调节空气和燃气流量。

(2) 试验条件。如果装在试验箱顶上的风速计测得的外部风速大于 8m/s , 则不能进行试验, 如果内侧的温度低于 5°C 或高于 40°C 时, 也不能进行试验。内侧墙温度在距箱底板上面 1.5 m、距一侧墙面 50 mm 和距门 1.0 m 的交点上进行测试。试验期间, 试验箱的门应始终关闭。

试验前作为试样应在 $(23 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ 温度下至少处理 16h , 试验箱应干燥。

(3) 供火时间。火焰燃烧时间为 40min 。

(4) 试验安排。此试验在一个至少 3m 长并带有一个连接点的标准直线形母线干线单元上进行。

用下列要求进行验证:

将同样型号的 3 个母线干线单元的接点朝向底端, 按规则的间隔置于火焰试验装置中一个垂直的梯架上, 每个母线干线应将不同的面朝向燃烧器进行火焰冲击, 见图 6.4-7。

对于大宽度母线干线, 被试的直线单元的数量可以减少, 但在这种情况下, 应按 3 种试验安排形式重复进行(考虑外壳侧的方向)。

对于带有分接装置的母线干线, 试验安排应将装有分接装置的出口端朝向燃烧器, 而且要把同正常使用时一样安装(例如: 带有覆板)的分接装置放在正好对着火焰的地方。

3.9.3 试验结果判定

燃烧停止后, 应将母线干线外壳擦干净, 清除掉所有的烟垢, 原表面应完好无损。非金属材料的软化和变形应忽略不计。破坏的最大范围的测量以米为单位从燃烧器的底边至开始烧焦的部位。

如果系统满足了下述条件, 则认为通过试验:

1) 无燃烧。

注: 不影响母线完整性的小部件的燃烧可以忽略。

2) 或者母线干线的烧焦部位(内部或外部)的最大范

围不高于燃烧器底边 2.5m。

3.10 建筑结构中防火性能的试验

如果母线干线系统水平或垂直通过建筑隔断 (如墙或地板), 母线干线防火板单元的设计应在着火时防止火焰蔓延, 用耐火试验进行检验。

3.10.1 试验设备

温度测量设备: 对于炉内温度 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 。
对于试件背火面温度 $\pm 4^{\circ}\text{C}$ 。
对于试件内部温度 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。

炉压测量设备: $\pm 3\text{Pa}$ 。

有载测量设备: 应加载荷值的 $\pm 2.5\%$ 。

时间测量设备: $\pm 2\text{s}$ 。

试件变形测量设备: 对于轴向收缩或膨胀 $\pm 0.5\text{mm}$ 。
对于其他变形 $\pm 2\text{mm}$ 。

试件缝隙测量探棒: 直径 6mm 的 $\pm 0.1\text{mm}$ 。
直径 25mm 的 $\pm 0.2\text{mm}$ 。

3.10.2 试验方法

该试验适用于为防止火焰蔓延设计的穿越建筑物的母线干线。

(1) 炉温控制。耐火性能试验应采用明火加热, 使试件受到与实际火灾相似的火焰作用。试验炉内温度随时间而变化, 其变化规律应满足下列函数关系

$$T - T_0 = 345 \lg(8t + 1) \quad (6.4-23)$$

式中: T 为升温到 t 时刻的平均炉温, $^{\circ}\text{C}$; T_0 为炉内的初始温度, 应在 $5 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 范围之内, $^{\circ}\text{C}$; t 为试验所经历的时间, min 。

表示以上函数的曲线即“标准时间—温度曲线”, 如图 6.4-10 所示。

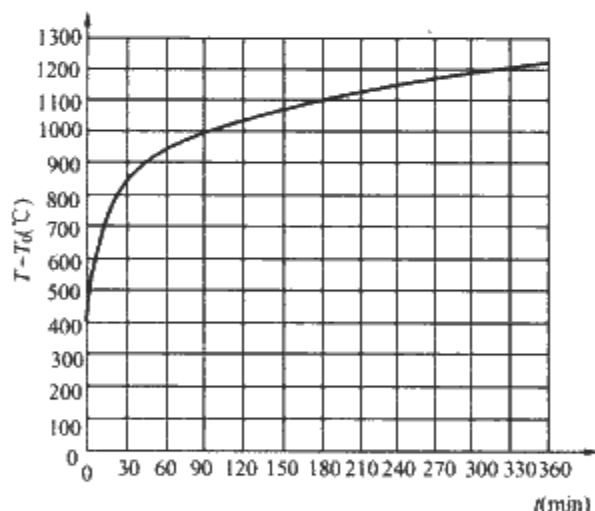


图 6.4-10 标准时间—温度曲线

(2) 允许控温偏差:

1) 试验期间的炉内实际平均温度与标准时间—温度曲线的偏差值 d 用式 (6.4-24) 确定, 即

$$d = \left| \frac{A - A_s}{A_s} \right| \times 100\% \quad (6.4-24)$$

式中: A 为实际平均炉温曲线下的面积; A_s 为标准温度曲线下的面积。

炉温允许偏差为:

- a. $0\text{min} < t \leq 10\text{min}$ 时: $d \leq 15\%$ 。
- b. $10\text{min} < t \leq 30\text{min}$ 时: $d \leq 10\%$ 。
- c. $t > 30\text{min}$ 时: $d \leq 5\%$ 。

面积计算的方法是: 上述 3 个炉温允许偏差中 a. 项的

时间间隔不超过 1min; b. 项的时间间隔不超过 2min; c. 项的时间间隔不超过 5min。

2) 在试验开始 10min 后的任何时间里, 由任何一个热电偶测得的炉温与标准时间—温度曲线所对应的标准炉温不能相差 $\pm 100^{\circ}\text{C}$ 。

3) 炉内温度测量。采用丝径为 $0.75 \sim 1.00\text{mm}$ 的热电偶, 其热端伸出套管的长度不少于 25mm 。试验开始时, 热电偶的热端与试件受火面的距离应为 $(100 \pm 10)\text{mm}$; 试验过程中, 上述距离应控制在 $50 \sim 150\text{mm}$ 之内。热电偶应保持良好的工作状态, 累计使用 20h 后, 应使用热电偶校验机校验, 符合其精度要求的方可继续使用。热电偶产生的热信号可经温度变送器或直接送到记录仪或计算机。水平或垂直分隔构件: 试件表面每 1.5m 至少有一个热电偶, 热电偶总数不少于 5 个。

横梁: 在每隔 1m 的长度上至少有 2 个热电偶, 热电偶总数不少于 6 个。

柱子: 在每隔 1m 的长度上至少有一个热电偶, 热电偶总数不少于 6 个, 呈螺旋形布置。

试验过程中, 标准温度、单点温度、平均温度以及偏差温度应能随时显示。

4) 炉内压力测量。试验开始 5min 后, 炉内应达到以下规定的正压条件:

a. 水平构件——在试件底面以下 100mm 处的水平面上, 炉压为 $15\text{Pa} \pm 5\text{Pa}$ 。

b. 垂直构件——在炉内 3m 高度, 离试件表面 100mm 处, 炉压为 $15\text{Pa} \pm 5\text{Pa}$ 。

试验开始 10min 后, 炉内应达到以下规定的正压条件:

a. 水平构件——在试件底面以下 100mm 处的水平面上, 炉压为 $17\text{Pa} \pm 3\text{Pa}$ 。

b. 垂直构件——在炉内 3m 高度, 离试件表面 100mm 处, 炉压为 $17\text{Pa} \pm 3\text{Pa}$ 。

对炉内压力测量, 应连续进行或每隔 2min 测量一次。

5) 试件背火面温度。试件背火面温度应连续测量。水平或垂直分隔构件, 热电偶数量不少于 5 个, 其中一个设在试件的中心, 其余分设在试件的各 $1/4$ 部位的中心。

热电偶应距离接缝、边缘、螺栓、螺钉头以及金属连接件至少 50mm 。

对于瓦垅或肋形结构, 热电偶的数目可以增加, 最厚处和最薄处的热电偶数目应相同, 但试件槽沟或凸脊的尺寸满足热电偶与该试件表面完全接触的要求。

6) 试件内部温度测量。采用与被测量范围相适应的热电偶。应把热电偶安装在试件内部选定的部位, 但不能因此影响试件的性能。热电偶的热端应保证有 50mm 以上的一段处于等温区内。

7) 试验安排。该试验在直线形母线干线单元样品上进行。用下列要求进行检验:

将一段有代表性的母线干线防火单元样品像实际用于建筑物中一样被安置在用混凝土制成的试验台上, 其厚度按照耐火时间的要求进行确定。应按照制造商的说明书和建筑物安全防火的要求 (如果有的话) 在穿过试验台开孔的母线干线外壳周围填充防火密封层。

如果母线干线装有防火单元, 该防火单元应放在试验台的中间, 见图 6.4-11。

应将一组热电偶放置在样品的非裸露面上, 用来记录母线干线外壳的表面温度, 耐火时间为 (min) 60, 120, 180, 240。

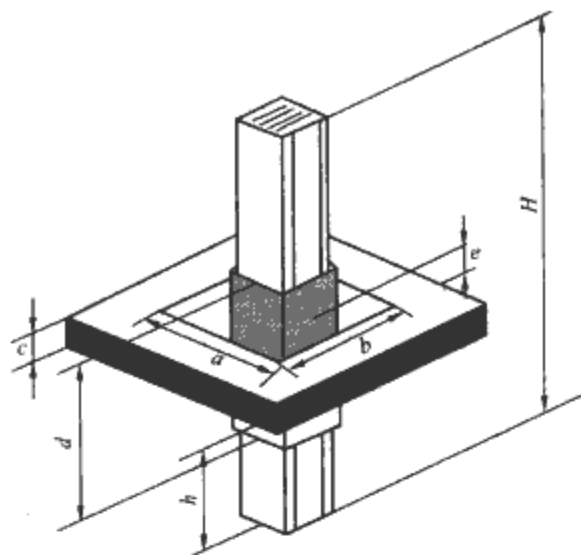


图 6.4-11 用来验证防火性能的试验台
 a, b —试验台开口的宽度和长度； c —试验台的厚度； d —防火部件的长度； e —热电偶在外壳的非裸露面的位置； h —母线干线样品裸露面的长度； H —母线干线样品的长度

3.10.3 试验结果判定

承重构件结果判定：

(1) 失去稳定性。在试验过程中试件发生塌跨；或梁板构件的最大挠度、柱构件的轴向变形、柱构件的轴向变形速率超过规定值时，则表明试件失去稳定性。即：

梁或板的最大挠度超过 $L/20$ (mm)。 L 为试件计算跨度，单位为 mm。

柱构件轴向变形大于 $h/100$ (mm) 或轴向变形速率大于 $3h/1000$ (mm/min)。 h 为柱构件在加载后，耐火试验前的初始受火高度，单位为 mm。

(2) 当承重构件同时起分隔作用时，还应按 (1) 的规定进行判定。

试验过程中当出现以上两条规定的任一项时，表明试件达到耐火极限。

耐火极限以小时计，小数点后保留两位有效数字。

第 5 章 配 电 板 试 验

1 简述

本章所述的试验方法、检测技术主要是用于对非专业人员可进入场地的低压成套开关设备和控制设备——配电板（包括照明配电箱、计量箱和插座箱）的试验。主要依据 GB 7251.3《低压成套开关设备和控制设备 第三部分：对非专业人员可进入场地的低压成套开关设备和控制设备——配电板的特殊要求》/IEC 60439—3 Low-voltage switchgear and controlgear assemble Part 3: Particulai requirements for Low-voltage switchgear and controlgear assemblies intended to be installed in placeff where unskilled persons have access for their use——Distribution boards。

2 试验项目

温升试验、介电性能试验、短路耐受强度试验、保护电路有效性试验、电气间隙和爬电距离测量、机械操作试验、防护等级试验、结构和标志检查、冲击强度试验、耐锈性能和耐潮湿性能试验、绝缘材料的耐热性试验、对非正常热和着火危险的耐受能力试验、附件紧固的机械强度试验。

3 试验方法

装置的介电性能试验、短路耐受强度试验、保护电路有效性试验、电气间隙和爬电距离测量、机械操作试验的试验方法见第 2 章。

3.1 试验程序

型式试验分为 3 个独立的程序，如表 6.5-1 所示。被选定经受指定程序中试验的一台样机应能完成此程序中顺序排列的全部试验。

表 6.5-1 型式试验的程序

序号	被 检 性 能	试 验 程 序		
		A	B	C
1	温升极限	3 ^①		
2	介电性能	4		2
3	短路耐受强度			1 ^①
4	保护电路有效性			3 ^①
5	电气间隙和爬电距离		2 ^①	
6	机械操作		1	
7	防护等级	6 ^①		
8	结构和标志	1 ^①		
9	冲击强度	5		
10	耐锈和耐潮湿性			4
11	绝缘材料的耐热性		3	
12	绝缘材料耐受非正常热和着火的能力			5
13	附件紧固的机械强度	2		

注 试验程序栏中给出的数字表示试验顺序。
① 所有的样机不能出现故障。

经受表 6.5-1 中第 1, 3, 4, 5, 7 或 8 项试验的样机不能出现任何缺陷。如果提交试验的第一台样机圆满地通过了试验程序，那么不要求对此试验程序重复试验。但是，如果一台样机在经受第 2, 6, 9, 10, 11, 12 或 13 项试验时失败，则应提供 3 台样机重复试验程序，各项试验合格方可视为通过。

3.2 温升试验

3.2.1 试验设备及环境条件
见第 2 章。

3.2.2 试验方法及要求

- (1) 配电板的额定电流。由制造厂按一条或多条进线电路的额定电流来确定。如有一条以上的进线电路，那么同时使用的所有进线电路额定电流的算术和是配电板的额定电流。当进行温升试验时，必须通此电流，各部件的温升应不超过第 2 章中表 6.2-4 的规定。
- (2) 额定分散系数。主电路数就是连接在每个供电相上的出线电路的数量。在制造厂未提供额定电流情况下，用表 6.5-2 给出的通用值。

表 6.5-2 额定分散系数

主 电 路 数	额定分散系数
2 或 3	0.8
4 或 5	0.7
6~9	0.6
10（及以上）	0.5

(3) 试验电流的确定。配电板的额定电流由制造商按进线电路的额定电流来确定。如有多条进线电路，配电板的额定电流是同时使用的所有进线电路额定电流的算术和。

配电板应通以规定的额定电流。应在尽可能少的出线电路中分配此电流，使每条出线电路通过的电流是其额定电流乘以表 6.5-2 给出的额定分散系数。如果用这些出线电路来承载上述电流不能达到精确的总负载，只允许把其中一条电路的承载（电流）降低以达到精确的总负载。

(4) 分支路数的确定。不论是单相还是三相输出，每一回路为一分支路数。

- (5) 各分支回路电流分配按以下原则：
- 1) 首先分配给电流大的分支路。
 - 2) 如果分支路电流相同时，优先分配给条件差的（指位于中间散热较差）的分支路。
 - 3) 如果分支路电流相同时，优先分配给带有热元件或熔断器的支路。
 - 4) 遇到有三相和单相分支路时，应优先分配到三相分支路。
- (6) 其他按第 2 章温升试验要求。

3.2.3 试验结果判定

试验结束时，各部位的温升不超过第 2 章表 6.2-4 规定的值为合格。

3.3 防护等级试验

在设备按照生产厂产品说明书安装就位并按正常使用接好线的情况下进行防护等级试验。

3.3.1 防护等级要求

户内配电板外壳防护等级至少为 IP2XC，可接近表面为 IP2XC。防护等级如果高于 IP2XC，按照 IEC60529。

3.3.2 试验方法

一般明装式照明配电箱，导线出入口一定要有密封用的橡胶圈，否则不能达到防护等级的要求。其他要求见第 2 章。

3.4 结构和标志检查

3.4.1 试验设备

试验设备为卷尺、游标卡尺。

3.4.2 试验方法及要求

3.4.2.1 铭牌、标志检查

(1) 铭牌。产品必须要有一个坚固耐久且明显可见的铭牌，其内容必须包括制造厂的厂名或商标以及该产品的型号，其他同第 2 章 9.4，只是⑬、⑭不适用。

配电板的铭牌可以安置在门后面或可拆卸的盖板后面。配电板的额定电流应在成套设备上或铭牌上标出。

(2) 标志：

1) 在产品内部应给出单独电路及其保护器件的识别标志，如果要标明成套设备电器元件，所用的标记应与随同成套设备一起提供的接线图上的标记一致。

2) 接地端子应有明显牢固的接地标志，元器件本身接地标志应拆除。所使用的图形和符号应符合相应的国家标准。

3.4.2.2 外接导线端子检查

(1) 端子应能与外接导线进行连接，如采用螺钉、连接件等，应保证维持适合于电器元件和电路的额定电流和短路强度所需要的接触压力。

(2) 在制造商与用户之间无专门协议的情况下，端子应能适用于连接随额定电流而定的最小至最大截面积的铜导线和电缆（见表 6.5-3）。

表 6.5-3 适合连接用铜导线的最小和最大截面积

额定电流 (A)	单芯或多芯导线		软 导 线	
	截面积 (mm ²)		截面积 (mm ²)	
	最小	最大	最小	最大
6	0.75	1.5	0.5	1.5
8	1	2.5	0.75	2.5
10	1	2.5	0.75	2.5
12	1	2.5	0.75	2.5
16	1.5	4	1	4
20	1.5	6	1	4
25	2.5	6	1.5	4
32	2.5	10	1.5	6
40	4	16	2.5	10
63	6	25	6	16
80	10	35	10	25
100	16	50	16	35

续表

额定电流 (A)	单芯或多芯导线		软 导 线	
	截面积 (mm ²)		截面积 (mm ²)	
	最小	最大	最小	最大
125	25	70	25	50
160	35	95	35	70
200	50	120	50	95
250	70	150	70	120
315	95	240	95	185

注 1. 如果外接导体直接连接在内装器件上，有关规定中给出的截面积应适用。
2. 如果要选用表中规定值以外的导体，建议由制造商和用户签订专门的协议。

当低压小电流（小于 1A，且交流电压低于 50V 或直流低于 120V）的电子电路外接导线必须连接到成套设备上时，表 6.5-3 不再适用。

表 6.5-3 适用于每个端子上连接一根铜导线。

(3) 用于接线的有效空间应使规定材料的外接导线和芯线分开的多芯电缆能够正确地连接。导线不应承受影响其寿命的应力。

(4) 如果制造商与用户间无其他的协议，在带中性导体的三相电路中，中性导体的端子应允许连接具有下述载流量的铜导线：①如果相导体的截面积大于 10mm²，则载流量等于相导体载流量的一半，但最小为 10mm² 导线的载流量；②如果相导体的截面积等于或小于 10mm²，则载流量等于相导体的载流量。

注意：对于非铜质导线，上述截面积建议以等效导电能力的截面积代替，此时可能需要较大尺寸的端子。在某些使用场合，中性导体电流可能达到很高的数值，例如：大的荧光灯照明装置，此时中性线的载流量必须与相导线的载流量相同，为此，制造商与用户之间应有专门的协议。

(5) 应提供与出线中性导体数量相同的接线端子，端子的位置或标志应与对应的相导体端子次序相同。还应为进线电路和出线电路的保护导体和那些可能要求（如系统要求）屏蔽接地的导体提供端子，并按上述要求确定位置并作出标志。接地端子应满足下列要求：①接地部分一定要牢固可靠，接地焊接件不准有开焊现象；②接地部分不准有严重粘漆和锈蚀现象，即使有少量也不能影响性能。

(6) 电缆入口、盖板等应在电缆正确安装好后，能够达到所规定的防触电措施和防护等级，也就是说电缆入口方式的选择要适合制造商规定的使用条件。

(7) 端子标志。应贴有符合规定的端子标志。

3.4.2.3 触电防护措施检查

触电防护措施检查见第 2 章中 5.1。其中直接接触的防护除绝缘、挡板、隔板及外壳等应满足有效防护外，照明配电箱还要有防护措施，如内装隔板或盒形拉伸件使开关操作手柄与带电体隔离。

第 2 章中 5.1.1 中 (2) 3) 中 a. 应为：移动或打开必须使用钥匙或工具。

在成套设备的内装部件需要进行临时性处理（例如更换灯泡或熔芯）的情况下，应提供一个屏障，以防止人员无意地接触那些不带其他防护措施的带电部件。不使用钥匙或工具不能移动此屏障，此屏障不需防止人员故意去触及带电部件。

如果带电部件的电压满足 SELV（安全超低电压）的条

件，则不须进行防护。

第 2 章 5.1.1 中：(2) 3) 中 c、d 不适用；(3) 不适用。

第 2 章 5.1.2 中 (2) 4) 删除“外壳提供的防护等级至少应为 IP3XD”，”和脚注。

成套设备内部操作与维修通道不适用。

3.4.2.4 开关器件和元件的选择

开关器件和元件的选择见第 2 章中 9.1，其中 9.1.4 抽出式部件不适用。

在非专业人员可以进入场地安装的成套设备中不允许有抽出式部件。

3.4.2.5 用挡板或隔板实现成套设备内部的隔离

用挡板或隔板实现成套设备内部的隔离见第 2 章中 9.1.5。

增加下述内容：

如果较低电压电路的接线是按主电路的相—地电压采用了绝缘电缆的，则可以不用挡板。

安全超低压电路的导体应安置在单独的隔室中，或用金属挡板或护套将不同电压下的电路的导体与保护导体分隔开，除非他们的绝缘能够适应可能出现的最高电压，绝缘导体可以是单独的，也可以是多芯电缆或其他导体组成。

3.4.2.6 母线与绝缘导线

母线与绝缘导线见第 2 章中 9.2，其中 9.2.3 中 (6) 不适用。

3.5 冲击强度试验

配电板的外壳还应能承受下述规定的耐冲击强度试验。装饰用部件和单独的器件不需经受冲击试验。配电板上的裸露部件，在按正常使用安装的情况下可能会遭受机械冲击，应检查是否符合要求。

3.5.1 试验设备

试验设备为弹簧锤，见图 6.5-1。

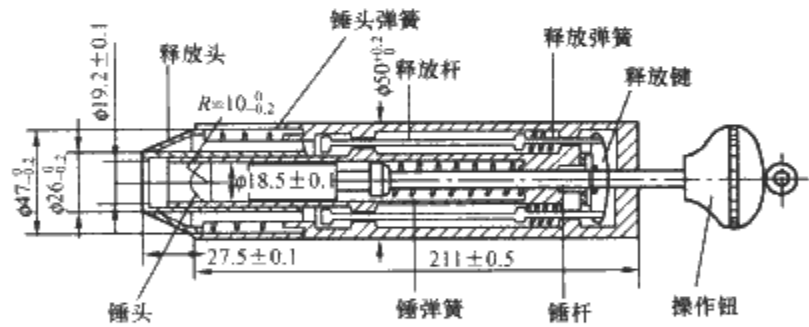


图 6.5-1 弹簧锤

3.5.2 试验方法及要求

(1) 撞击前的准备：

1) 先将试样在 $(-5 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 的温度中放置 2h，然后再进行试验。

2) 如果试样带有盖板或外壳，应按正常使用安装或固定在支架上。

3) 没有配备敲落孔的电缆入口应打开；如有，则应打开其中的两个。

4) 在实施撞击前，基座的固定螺钉、盖板和类似装置应使用与表 6.5-4 规定相等的扭力矩紧固。

(2) 撞击试验要求：

1) 撞击部位和次数：对 5 个可接近的表面和门（如果有）的不同部位各进行 3 次撞击。不应符合其他标准的内装元件或固定设备的嵌入部分实施撞击。

表 6.5-4 用于验证机械强度的扭力矩

螺纹直径 (mm)		扭紧力矩 (N·m)		
米制标准值 (mm)	直径范围 d (mm)	I	II	III
2.5	$d \leq 2.8$	0.13	0.26	0.26
3.0	$2.8 < d \leq 3.0$	0.16	0.33	0.33
—	$3 < d \leq 3.2$	0.20	0.40	0.40
3.5	$3.2 < d \leq 3.6$	0.26	0.53	0.53
4	$3.6 < d \leq 4.1$	0.47	0.80	0.80
4.5	$4.1 < d \leq 4.7$	0.53	1.20	1.20
5	$4.7 < d \leq 5.3$	0.53	1.33	1.33
6	$5.3 < d \leq 6$	0.80	1.66	2.00
8	$6 < d \leq 8$	1.66	2.33	4.00
10	$8 < d \leq 10$	—	2.66	6.66
12	$10 < d \leq 12$	—	—	9.33
14	$12 < d \leq 15$	—	—	12.6
16	$15 < d \leq 20$	—	—	16.6
20	$20 < d \leq 24$	—	—	24
24	$24 < d$	—	—	33

注 I 栏适用于拧紧时不突出孔外的无头螺钉和不能用刀口宽度大于螺钉直径的螺钉旋具（又称螺丝刀、起子）拧紧的其他螺钉。

II 栏适用于可以用螺钉旋具旋紧的螺母和螺钉。

III 栏适用于可以用螺钉旋具以外的工具旋紧的螺母和螺钉。

2) 每次撞击的能量为 0.7J。

3.5.3 试验结果判定

试验后试样不应出现本部分所述的损坏。尤其下列部件不应出现损坏：

- 1) 盖板，损坏时易触及带电部件或影响设备的使用。
 - 2) 操动机构。
 - 3) 绝缘材料和同类物的敷层和护套。
- 可能外部部件如外壳和盖板或其敷层没有损坏，在有疑问的情况下，应拆开这些部件进行验证。

以下情况可忽略不计：

- 1) 用正常视力观察不明显的裂缝。
- 2) 纤维增强模压材料或同类物上的表面裂缝。
- 3) 不会导致电气间隙和爬电距离减小到规定值以下的轻微凹陷。
- 4) 不会对电击防护造成不利影响的碎屑。

3.6 耐锈性能和耐潮湿性能试验

3.6.1 耐锈性能试验

此试验适用于防锈措施相同的不带内装元件的成套设备、单独的部件或大部件的零件。配电板的黑色金属部件，包括外壳应进行耐锈性能试验。

(1) 试验设备：高低温湿热试验箱。

(2) 试验方法及要求：

1) 将被试配电板钢制外壳的代表性试样放在诸如三氯甲烷或精炼汽油之类的冷化学脱油剂中浸泡 10min，除去所有的润滑油。再将部件放在温度为 $(20 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ 的 10% 氯化氨水溶液中浸泡 10min。

2) 不需烘干，甩掉水滴后将试样置于温度为 $(20 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ 充满潮湿的饱和气体的容器中 10min。

3) 将部件置于温度为 $(100 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ 的加热熔器中烘干 10min 后，再置于室温 24h，其表面应无任何锈迹。

对于小的螺旋弹簧和同类物，对于不可接近的易磨损部件，可提供一层足以防锈的润滑剂，如果对润滑剂的有效性产生疑问，才对这些部件进行试验，试验时不应去除原有的润滑剂。

(3) 试验结果判定: 试验后表面应无任何锈迹(边缘上的锈痕和可擦掉的任何黄印可以不考虑在内)为合格。

3.6.2 耐潮湿性能试验

(1) 试验设备: 高低温湿热试验箱、工频耐压机。

(2) 试验方法及要求:

1) 试验条件:

a. 此试验应带着配电板外壳连同母线和端子一起进行, 但不包括那些在各自的产品标准中所覆盖的其他元件。

b. 如果有进口应打开。如果配备有敲落孔, 则应打开其中的一个。

c. 不借助工具即能拆卸的部件应卸下, 并对主要部件进行加湿处理。在处理期间应打开弹簧件的弹簧帽。

2) 试验步骤:

a. 湿热试验前, 应将试样置于室温下至少 4h。

b. 试验应持续 4 天。试验箱内温度应保持在 $(40 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度应保持在 $93\% \pm 3\%$ 的范围内。

c. 试验完成后, 应将拆卸的部件复原, 并关闭弹簧帽。

d. 上述过程完成后试样应经受工频耐压试验, 时间为 5s。在不同部件之间, 试验电压应至少为 $2U_i + 1000\text{V}$ 。此验证应在 4 天耐潮湿试验的最后 1h 内进行。

(3) 试验结果判定: 潮湿试验后, 试样经受工频耐压试验, 无击穿闪络为合格。

3.7 绝缘材料的耐热性试验

3.7.1 试验设备

试验设备为球压试验仪器、高温试验箱。

3.7.2 试验方法及要求

此项试验适于拆除了内装元件(开关器件、指示灯等)的配电板。

(1) 验证绝缘材料的耐热性。将配电板置于温度为 $(70 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的加热容器中 168h。成套设备的结构部件(包括外壳、盖板等)不应出现任何影响配电板使用的变化, 标志应始终清晰可见。

允许对配电板的单独部件(护板、箱体、外壳等)进行试验, 应采取适当的措施使试验具有代表性。

对试验有影响的安装元件, 也必须参与此项试验。

(2) 球压试验: 将载流部件固定在其位置上使用的绝缘材料制成的零部件要经受球压试验, 此试验用图 6.5-2 示出的仪器进行。

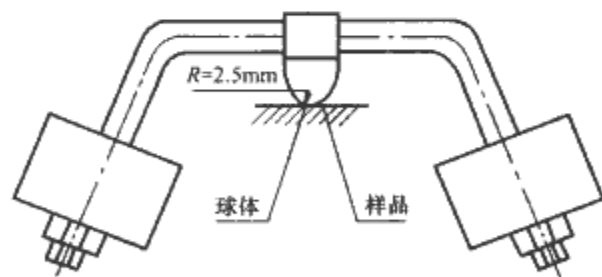


图 6.5-2 球压试验仪器

注意: 做此试验时, 保护导体(PE)不视为载流部件。

被试部件的表面要水平放置, 然后用直径为 5mm 的钢球以 20N 的力压迫此表面。

试验在温度为 $(125 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的加热容器中进行, 1h 后将球取下。然后把样机浸入冰水中, 在 10s 内使样机的温度降至近似室温。而后, 测量球压所致凹陷的直径, 其直径不应超过 2mm。

对于不用来固定载流部件的绝缘材料, 只要它们与载流部件接触, 也要按照上述方法进行球压试验, 但试验应在

$(70 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 下进行。也可以在超过相关部件温升(根据 GB 7251.1 中 8.2.1.3 温升试验确定)的 $(30 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的温度下进行, 选二者中较高的值。

3.8 对非正常热和着火危险的耐受能力试验

3.8.1 试验设备

试验设备为灼热丝试验仪。

3.8.2 试验方法及要求

预处理: 试验开始之前, 将样品置放于温度为 $15 \sim 35^{\circ}\text{C}$ 之间, 相对湿度在 $35\% \sim 75\%$ 之间的大气中 24h。

以下是各种载流部件在各自规定的灼热丝顶部温度下耐受非正常热和着火危险试验。

(1) 将载流部件固定在其位置上所需要的部件:

试验温度: $(960 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 。

试验时间: $(30 \pm 1)\text{s}$ 。

铺底材料: 绢纸(包在 10mm 厚的白松木板上, 放在距离试样 200mm 处)。

(2) 用来安装在嵌入墙内的部件:

试验温度: $(850 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 。

试验时间: $(30 \pm 1)\text{s}$ 。

铺底材料: 绢纸(包在 10mm 厚的白松木板上, 放在距离试样 200mm 处)。

(3) 所有其他部件, 包括不是用来将载流部件固定在其位置上的部件和嵌入在不易燃烧的墙内的部件:

试验温度: $(650 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 。

试验时间: $(30 \pm 1)\text{s}$ 。

铺底材料: 绢纸(包在 10mm 厚的白松木板上, 放在距离试样 200mm 处)。

3.8.3 试验结果判定

应无火焰或不灼热, 或者火焰在灼热丝移开 30s 内熄灭; 铺底层绢纸不起燃, 松木板不烧焦为合格。

3.9 附件紧固的机械强度验证

本试验仅适用于没有产品标准的部件。

3.9.1 试验设备

试验设备为扭力矩螺钉旋具或扳手。

3.9.2 试验方法及要求

应使用符合表 6.5-4 给出扭力矩的合适的螺钉旋具或扳手进行试验。

螺钉或螺母应拧紧, 但不能过力。

(1) 螺钉或螺母应被旋紧后再拧松:

1) 固定设施为绝缘材料的, 啮合 10 次。

2) 其余材料啮合 5 次。

在绝缘材料上啮合, 每次都应完全释放再重新拧紧。

(2) 对于需用螺钉旋具拧紧的六角头螺钉, 如果表 6.5-4 中 II 和 III 栏给出的值不同, 应进行两次试验:

1) 用扳手按照表 6.5-4 中 III 栏给出的扭力矩拧紧六角螺钉。

2) 在新的试样上用螺钉旋具按照表 6.5-4 中 II 栏的规定加力矩。

如果表 6.5-4 中 II 和 III 栏给出的值相同, 则只用螺钉旋具进行试验。

3.9.3 试验结果判定

试验过程中, 螺钉连接不应出现松动和损坏, 也不应发生类似螺钉破碎或裂纹, 螺纹、垫圈等或外壳和盖板的损坏。

第6章 建筑工地用成套设备(ACS)试验

1 简述

本章所述的试验方法、检测技术主要用于建筑工地中使用的成套设备的试验,包括进线单元、计量单元、变压器单元和出线单元。此类成套设备可以是可运输式的或可迁移式的。主要依据 GB 7251.4—2006(等同于 IEC 60439—4:2004)《低压成套开关设备和控制设备第四部分:对建筑工地用成套设备(ACS)的特殊要求》。

2 型式试验项目

温升试验、介电性能试验、短路耐受强度试验、保护电路有效性检测、电气间隙与爬电距离测量、机械操作试验、防护等级试验、机械强度试验、耐腐蚀能力试验、连接线、通电操作。

3 试验方法

装置的温升试验、介电性能试验、短路耐受强度试验、保护电路有效性检测、电气间隙与爬电距离测量、机械操作试验的试验方法见第2章。

3.1 防护等级试验

3.1.1 试验设备

见第2章。

3.1.2 试验要求

当所有固定的门和所有的活动面板及盖板安装就位后,ACS的所有部件的防护等级至少应为 IP44。通风口和排泄口不得降低所要求的防护等级。门里操作面的防护等级不得低于 IP21,但要求此门在所有使用条件下能够关闭。如果此门不能关闭,则操作面的防护等级至少应为 IP44。装在 ACS 外部的插件,插头插拔时,其防护等级至少等于 IP44。

3.1.3 试验结果判定

门里操作面的防护等级不得低于 IP21,但要求此门在所有使用条件下能够关闭。如果此门不能关闭,则操作面的防护等级至少为 IP44。

3.2 机械强度试验

机械强度试验应在成套设备上,目的是用来揭露机械弱点和性能下降情况。试验样机应完全去除包装,并以工作状态安放,但要切断电源。

机械强度试验包括撞击试验和冲击试验。试验应在环境温度 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$,且 ACS 在此温度下放置至少 12h 后进行。

3.2.1 撞击试验

(1) 试验设备:撞击试验装置。

(2) 试验方法:样品 ACS 固定在一个足够坚固的支承物上,以使 ACS 在规定的撞击力作用下的位移被限制在 0.1mm 以内。在试验中,采用以下两种方法之一对 ACS 的每个表面施加 3 次连续撞击,撞击能量为 6J。

1) 用一个直径为 50mm,质量为 (500 ± 25) g 的实心

钢球,从 1.2m 的垂直高度由静止状态开始自由降落至外壳的水平表面,如图 6.6-1(a)所示。

2) 将同样的钢球用绳子悬挂起来,像摆锤一样摆动,从 1.2m 的垂直距离处施加水平的撞击,如图 6.6-1(b)所示。

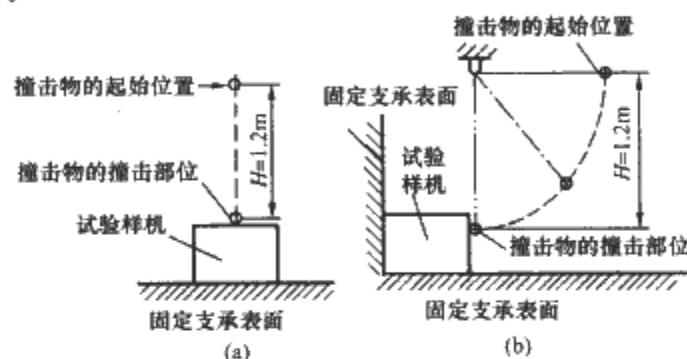


图 6.6-1 用撞击物进行的撞击试验

(a) 方法一; (b) 方法二

倾斜表面可以用摆锤进行试验,但如果此方法不适宜,可以把该样机放在支架上旋转,使其表面呈水平面放置,这样就可以采用撞击试验方法 1) 陈述的方法进行试验。在每次试验前,应对钢球进行目测检查,以确保钢球没有毛刺或瑕疵。

3) 撞击位置:在极有可能暴露弱点的部位进行,应对 ACS 共实施 18 次撞击。不适合在插座、操作手柄、照明灯、按钮、操动机构等元件的近距离表面部位进行,试验点应距这些元器件的暴露部位至少 1cm。

(3) 试验结果判定。外壳的防护等级应保持 IP44;门能关闭,操作面的防护等级不得低于 IP21,门不能关闭,操作面的防护等级不得低于 IP44。外壳和元件的任何扭曲或变形都不影响对 ACS 本身功能产生不利的影响,电气间隙和爬电距离不得低于要求值,操动机构、手柄仍可使用。

表面损伤、涂层脱落、散热片或类似部件的断裂以及轻微的凹陷和裂纹,正常视力观察不明显,不会进一步扩大的裂痕或表面裂纹,仍可认为通过了试验。

3.2.2 冲击试验

冲击试验是用来模拟样品的实际运输和工作环境效应。

(1) 试验设备:冲击试验台。

(2) 试验方法:

1) ACS 应经受半正弦波脉冲的冲击,冲击峰值加速度 500m/s^2 (50g),持续时间为 11ms。

2) 应对正常工作状态下的 ACS 的 3 个互相垂直方向的每一个方向连续施加 3 次冲击,即共 18 次。当多个相同的样品同时试验时,可通过不同方向的安装,以使样品能同时承受上述各轴线和各方向的冲击。

制造商与用户如有协议,则可以在 ACS 的独立部件上进行试验。

(3) 试验结果判定:外壳的防护等级应保持 IP44,门能关闭,操作面的防护等级不得低于 IP21,门不能关闭,操作面的防护等级不得低于 IP44。外壳和元件的任何扭曲或变形都不影响对 ACS 本身功能产生不利的影响,电气间

隙和爬电距离不得低于要求值,操动机构、手柄仍可使用。表面损伤、涂层脱落、散热片或类似部件的断裂以及轻微的凹陷和裂纹,正常视力观察不明显,不会进一步扩大的裂痕或表面裂纹,仍可认为通过了试验。

3.3 耐腐蚀能力试验

3.3.1 正常工作条件下耐腐蚀能力的试验

- (1) 试验设备:湿热箱。
- (2) 试验方法:试验进行 3 个周期,每周期为 24h(总计 72h),每个周期的温度和湿度变化在图 6.6-2 中确定。
- (3) 试验结果判定:在试品内部和外部未发现任何腐蚀痕迹(锐利边缘除外),试验后进行介电性能试验,电气装置中未发生由于凝露造成的任何损坏,则认为通过了试验。

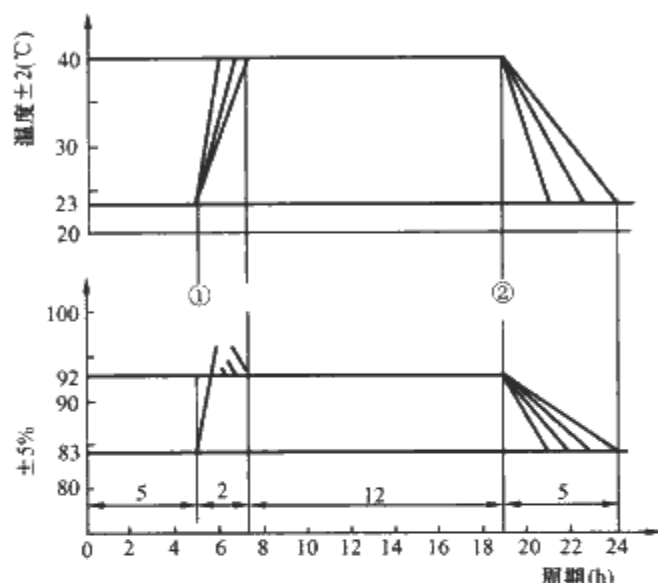


图 6.6-2 每周期温度和湿度的变化

3.3.2 严重污染大气中的耐腐蚀能力的试验

- (1) 试验设备:二氧化硫腐蚀试验箱。
- (2) 试验方法:对 ACS 进行二氧化硫试验 10 天。试验箱内气体的组成如下:
 二氧化硫: $(25 \pm 5) \times 10^{-6}$ (体积比)。
 二氧化碳:不大于 4500×10^{-6} (体积比)。
 温度: $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。
 相对湿度: $75\% \pm 5\%$ 。

试验开始前,必须测量二氧化硫的浓度、温度和相对湿度,当试验条件达到稳定时开始试验。在试验过程中,必须定期检查以确保这些条件符合试样要求。放置试验样品时,不要互相接触和挡住试验气体。试验中的试验样品不能进行清洁。

(3) 试验结果判定:试验结束后,ACS 离开试验场地 24h 后,进行介电性能验证。试验后,在内部和外部无任何腐蚀痕迹(陡缘除外);介电性能试验后,电气设备无任何损坏,则认为通过了试验。

3.3.3 替换性

ACS 所进行的试验可以用试验样机替换进行。正常工作条件下耐磨蚀能力和严重污染大气中的耐腐蚀能力的试验可在有同样的电气和机械结构,并应包括至少一件被检 ACS 表面加工防腐处理的所有材料的所有类型的样机上进行。

3.4 连接线、通电操作

3.4.1 元器件的选择

(1) 与外部电缆的所有连接都应是可拆卸或插接式的。插座应符合相关标准,其电流额定值至少为 16A。

(2) 不同的额定电流或电压的插头应是不可互换的,以避免误接。

(3) 三相插座的接线应保持同样的相序。

3.4.2 母线与绝缘导线

见第 2 章。

3.4.3 防护措施验证

- (1) 试验设备:见第 2 章。
- (2) 试验要求:
 1) 对于直接接触的防护,应从 ACS 的设计和结构上获得。外表面的防护等级应不小于 IP44,门里的操作面不得低于 IP21(要求此门能够关闭)。
 2) 保护导体截面积应不小于 2.5mm^2 。
 3) 当使用插头与插座器件时,在 ACS 的主接地端子和插座的接地端子之间应接上一个合适的保护导体。
 4) 装在 ACS 外部的插件,当插头插拔时,其防护等级至少为 IP44。

3.4.4 装置结构和安装检查

- (1) 试验设备:目测。
- (2) 试验方法及要求:
 1) 所有的电气元件都应该装配在带有活动面板、盖板或门的外壳内。
 2) 只有相同电源的设备才能安装在同一外壳内,控制电路或信号电路及备用电源例外。但是,外壳内功能单元的额定电压可以不同。

3) 在不使用钥匙或工具的情况下,只有插座、操作手柄和控制按钮可以接触。主开关的操作件应易于接触。

4) 每个 ACS 都应配备支撑部件,以使其能够水平放置,和/或配备部件以将其固定在垂直面上,这些部件应连接到外壳或支撑框架。各种支撑部件和固定部件都应在外壳的外部,但要与其牢固连接。所有 ACS 的设计应使元件(诸如插座和与其连接的所有插头)的机械损坏减到最小。电缆出口应在距离地面最近处,并与可能连接 ACS 的最大电缆的弯曲半径相适应。

5) ACS 应配备起吊和/或装卸设备,并且应将其牢固连接在外壳或支撑框架上。

其他见第 2 章。

3.4.5 铭牌、标志的检查

铭牌上应具备以下 7 项:① ACS 制造商名称或商标;② 产品型号名称或标志号;③ GB7251.4 规定的内容;④ 电流类型(以及在交流情况下的频率);⑤ 额定工作电压;⑥ 额定电流;⑦ 防护等级。

注意:如果一个单元的质量超过了 30kg,应将质量标在铭牌上。

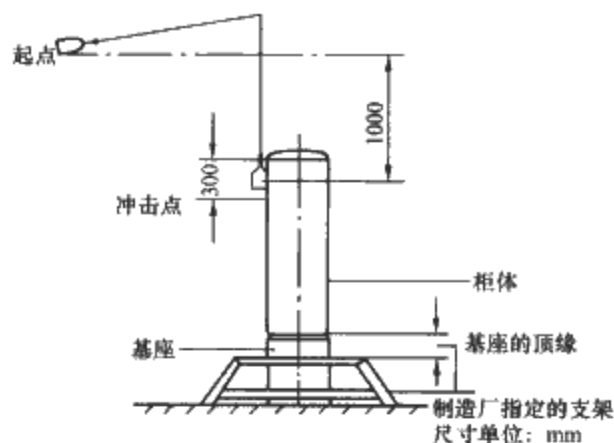


图 6.7-3 验证耐冲击负载的试验图

CDCs 门要关闭，应能承受图 6.7-4 所示的 $2 \times 1000\text{N}$ 的扭力，时间为 30s。

3) 试验结果判定：试验期间门一直保持关闭状态，试验后防护等级仍为 IP34D，则认为通过了此项试验。

60×60×5 的角铁，长度 100

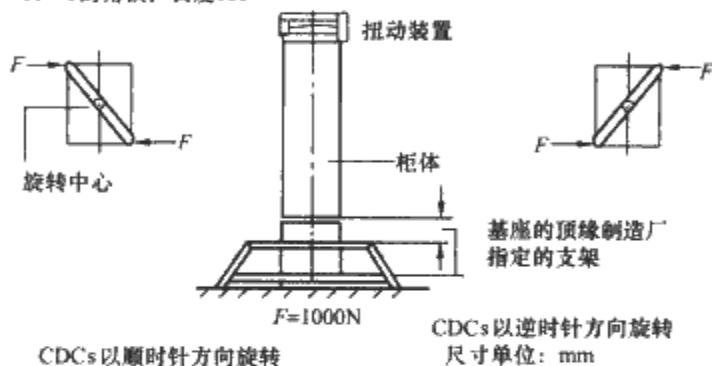


图 6.7-4 耐扭力试验

3.2.2 耐撞击试验

(1) 在 $(-25 \sim 40)^\circ\text{C}$ 范围内使用的 CDCs 的试验：

1) 试验设备：淋水设备、钢试棒、撞击试验台。

2) 试验方法：

a. 将 CDCs 置于 $10 \sim 40^\circ\text{C}$ 之间的环境温度中至少 12h 后，在此温度下，进行撞击试验，如图 6.7-5 所示，钢球质量 2kg，将它提到 1m 的高度后下落，使其撞击到被试的 CDCs 的表面，撞击能量 20J。

b. 撞击位置：对 CDCs 每个垂直表面进行撞击，如果外形是圆形的，试验将包括 3 次撞击，每次撞击的位置要有 120° 的角位移。

c. 将 CDCs 置于 -25°C 环境温度至少 12h 后，立即在 $10 \sim 40^\circ\text{C}$ 的环境温度进行撞击试验，试验方法见 a。

d. 撞击位置，撞击能量同 a、b。

3) 试验结果判定：见 (2) 耐冲击负载试验 3)。

(2) 严寒地区使用的 CDCs 的试验：

1) 试验设备：淋水设备、钢试棒、撞击试验台。

2) 试验方法：将 CDCs 置于 -50°C 的环境温度下至少 12h 后，立即在 $10 \sim 40^\circ\text{C}$ 之间的环境温度下，对其进行试验。试验 1 和试验 2 是用一个接地的金属试验件以 1500N 的力对外壳上被认为最薄弱的 10 个部位进行撞击，时间为 30s。试件应是半径为 $100\text{mm} \pm 3\text{mm}$ 的球体或半球体。

a. 试验 1：应在空的 CDCs 上进行。

b. 试验 2：应在其外壳内的元件具有最小的电气间隙的 CDCs 上进行。

在试验期间此外壳应该接地，并且应在所有相互连接的带电部件和外壳之间进行介电性能试验，施加值见第 2 章。

c. 试验 3：将在空的 CDCs 上进行。如图 6.7-5 所示，钢球质量 15kg，将它提到 1m 的高度后下落，使其撞击到被试的 CDCs 的表面，撞击能量 150J。

撞击位置：对 CDCs 每个垂直表面的中心部位进行撞击。如果外壳是圆形的，试验将包括 3 次撞击，每次撞击的位置要有 120° 的角位移。

3) 试验结果判定：试验后，防护等级仍保持为 IP34D，门和闭锁装置仍保持良好的功能，则认为通过了试验 1。没有出现击穿或闪络现象则认为通过了试验 2。试验后，防护等级仍至少为 IP3X，则认为通过了试验 3。

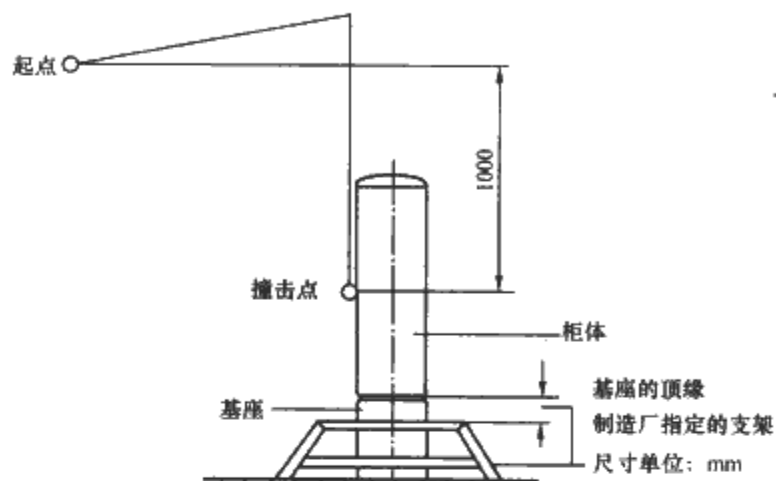


图 6.7-5 验证耐撞击的试验

注意：当安装在有大雪和积雪而且需用扫雪机清除积雪的地区时，根据制造厂和用户之间的协议，可以将寒冷气候视为一般条件；但是适用的温度下限为 -25°C 。

3.2.3 门的机械强度的试验

适合于外壳的垂直面上带有铰接门的所有类型的 CDCs。

(1) 试验设备：淋水设备、钢试棒、拉力试样台。

(2) 试验方法：进行试验时，试品的门要完全打开，并与阻挡机构接触，门的上边缘距离铰接边 300mm。

1) 非铰接的门，外施加 50N 负荷，持续 3s。

2) 非铰接的门之外的其他门，施加 50N 负荷，持续 3s 后，应重复进行此试验并将负荷增加至 450N，如图 6.7-6 所示。

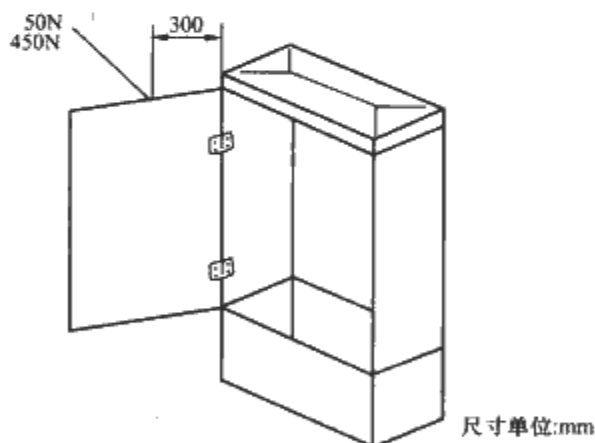


图 6.7-6 验证门的机械强度的试验

(3) 试验结果判定：

1) 非铰接的门施加 50N 负荷后，门铰接和闭锁装置的功能没有被破坏，防护等级仍保持 IP34D 为合格。

2) 非铰接的门之外的其他门，施加 50N 负荷后，门铰接和闭锁装置的功能没有被破坏，另外施加了 450N 负荷后，门重新关闭时，没有被破坏，则认为通过了此试验。如果做后一项试验时，铰接脱落了，若不使用工具即可恢复原位，则不认为试验失败。

3.2.4 合成材料中金属嵌件轴向负荷的耐受能力的试验

(1) 试验设备：拉力试验台。

(2) 试验方法：本试验应对装有各种类型、尺寸金属嵌件的代表性样机进行该试验。同时，如果一种特定金属嵌件

的周围材料成型的厚度不同时, 则应在此条件下重复此试验。

试验期间, CDCs 应整体由平台托住, 每个被试金属嵌件的螺纹孔都要安装好, 并按照表 6.7-1 施加轴向力, 时间为 10s, 以试图将嵌件从嵌入凹槽中拉出。

(3) 试验结果判定: 如果嵌件仍处在原来位置上, 并仍保持完好, 而且嵌入凹槽的周围材料也没有出现裂纹, 则认为通过了试验。

注意: 试验前已有的小裂纹或气泡, 如果没有因为施加轴向负荷而加重损坏, 则可以忽略不计。

表 6.7-1 试验所需轴向负荷			
嵌件的尺寸	轴向负荷 (N)	嵌件的尺寸	轴向负荷 (N)
M4	350	M8	500
M5	350	M10	800
M6	500	M12	800

3.2.5 对角状物机械撞击的耐受能力的试验

此试验适用于所有类型的 CDCs。

(1) 试验设备: 钢质撞击物。

(2) 试验方法:

1) 将 CDCs 置于 10~40℃ 之间的环境温度至少 12h 后, 在此环境温度下使用质量为 5kg 的钢质撞击物, 其形状见图 6.7-7, 撞击物被提高到 0.4m 高度, 再使其下落, 以撞击试品表面。

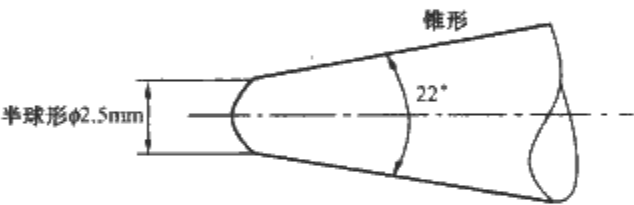


图 6.7-7 进行耐角状物撞击试验的撞击物

撞击能量: 20J。

撞击位置: 对 CDCs 处于正常使用位置时所能见到的每个垂直面上最薄弱的地方进行一次撞击, 每次撞击试验可以使用不同的外壳。

如果外壳是圆形的, 试验将包括 3 次撞击, 每次撞击的位置要有 120° 的角位移。

2) 将 CDCs 置于 -25~5℃ 的环境温度中至少 12h 后, 立即在 10~40℃ 的环境温度下进行试验。

撞击能量、撞击位置同 1)。

(3) 试验结果判定: 试验后, 由撞击导致的裂纹都在直径不超过 15mm 的撞击圈内, 则认为通过了试验。如果撞击物的尖端部穿透了 CDCs 的表面, 而且形成的孔绝对不能插入一个具有半球形顶端、直径为 4mm 的圆柱形钢质塞规, 则认为通过了试验。插入塞规时, 施加 5N 的力。

3.2.6 基座的机械强度试验

(1) 试验设备: 基座的机械强度试验台。

(2) 试验方法: 应按照图 6.7-8 和制造厂的安装说明书对固定在基座上的 CDCs 进行此试验。当 CDCs 基座安装在地下以后, 用一根薄壁钢管对 CDCs 基座最长表面上的最低部位施加机械力。如果基座的设计包含一个或多个永久性的支架, 则应该用数根钢管施加机械力。每根钢管分别放在每个支撑点的中部。每个单独的力应同时施加在每根管子上, 并应按照下面公式进行计算:

$$F = 3.5L \tag{6.7-1}$$

式中: 3.5 为单位长度钢管所受重力, N/mm; L 为支撑点

之间的长度, mm。

力 (F) 的施加时间为 1min。而后在施加的力仍维持时, 应验证其防护等级。

如果 CDCs 的基座具有长度相似但形状不同的其他表面, 则应在此表面上重复试验。

(3) 试验结果判定: 检查基座是否断裂, 如果 CDCs 基座在地面以上的防护等级仍保持 IP3XD, 则通过了试验。

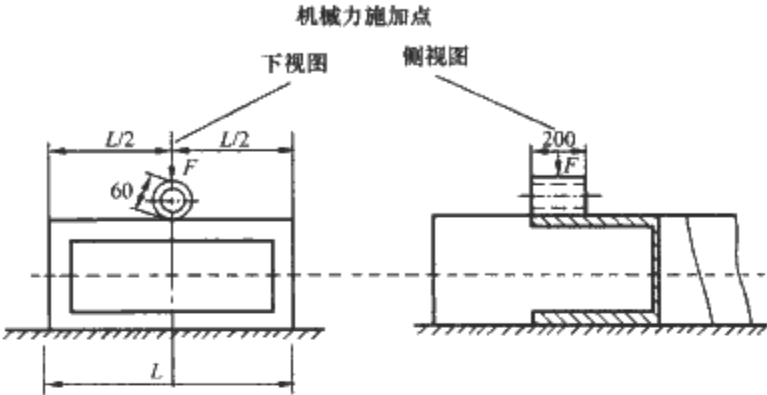


图 6.7-8 基座的机械强度试验典型安排

3.3 防护等级试验

当一个 CDCs 按照制造厂的说明书完好安装好后, 外壳应具有的防护等级至少为 IP34D。

其他见第 2 章。

3.4 对高热和火焰的耐受能力的试验

3.4.1 对高热的耐受能力的试验

对外壳、挡板和其他绝缘部件, 包括电器和元件上的每个绝缘材料的样品, 均应进行此试验。

(1) 试验设备: 球压试验装置、高温箱。

(2) 试验方法:

1) 被试部分的表面水平放置, 由一块厚度为 5mm 的钢板支托, 再用直径为 5mm 的球以 20N 的力压迫此表面。

试验温度选择见表 6.7-2。

表 6.7-2 试验温度选择	
部 件	试验温度 (℃)
支撑带电部件	125±2
与温升高于 40K 的部件的距离 小于 6mm 的绝缘件	100±2
其他部件	70±2

2) 试验 1h 后, 将球从样品上离开, 样品浸入冷水中, 以使其在 10s 之内被冷却至室温。

(3) 试验结果判定: 测量球对样品所造成的压痕, 直径不得超过 2mm。

注意: 当不可能在整个设备上试验时, 则可以在一个合适的部件上进行, 其厚度至少为 2mm, 可利用增加层数达到 2mm。试验在原材料上进行时, 样品的厚度至少为 2mm。

3.4.2 可燃性等级试验

(1) 试验设备: 垂直燃烧测定仪。

(2) 试验方法: 选择外壳、挡板和其他绝缘部件的每种材料的有代表性的样品, 以 5 个样品为一组, 按照 FH 试验方法经受可燃性试验。

1) 试验步骤:

a. 将试样纵轴保持水平, 横轴倾斜 45°, 带标记线的宽面向上, 安装在试样夹具中, 见图 6.7-9。

b. 将本生灯远离试样 (至少 150mm) 垂直放置, 点燃

- 并将火焰调节成 (25 ± 2) mm 高的蓝色火焰。
- c. 移动本生灯托架, 使灯管中心轴线与试样纵向底边处于同一垂直平面内, 并与水平成 45° , 让试样自由端约 6mm 长承受火焰, 施加火焰 30s, 然后移开本生灯; 如果施加不到 30s, 火焰前沿就已蔓延到第一条标记线, 应立即移开本生灯停止施加火焰。
- d. 如果本生灯移开后试样火焰继续燃烧, 则测量火焰燃烧前沿从第一条标记线蔓延到第二条标记线的时间, 以秒为单位。用两条标记线之间的距离 (75mm) 除以火焰在两条标记线之间的燃烧时间, 计算燃烧速率。
- e. 如果火焰前沿蔓延到第二条标记线之前熄灭了, 则测量燃烧破坏的最大长度。
- 2) 试验次数: 按以上试验步骤, 分别在 5 个试样上进行试验。

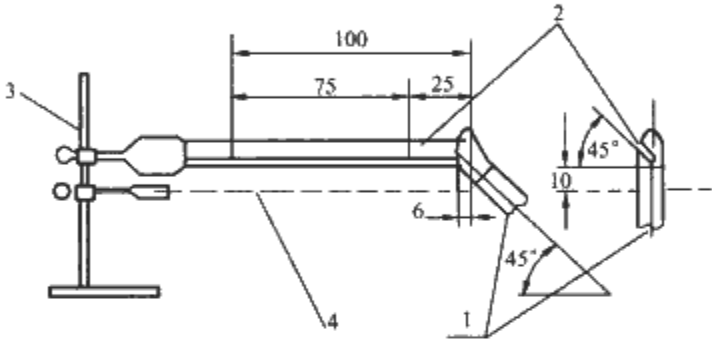


图 6.7-9 火焰水平试样燃烧装置示意图
1—本生灯; 2—试样; 3—铁架台; 4—金属丝网

- (3) 试验结果判定: 每一组样品都能达到 FH2 级, 火焰前沿蔓延到第二条标记线之前熄灭, 且燃烧破坏的最大长度为 40mm, 则认为通过了试验。
- 3.4.3 干热试验
- (1) 试验设备: 高温湿热箱。
- (2) 试验方法: 将完整的 CDCs 放置在恒温箱, 将恒温箱在 2~3h 内升至 $(100 \pm 2)^\circ\text{C}$, 维持此温度 5h。
- (3) 试验结果判定: 试验后没有明显的损坏迹象, 则认为通过了试验。

3.5 耐腐蚀、耐老化试验

任何类型的 CDCs 都应经受下列试验, 以验证耐腐蚀性能。

- 3.5.1 内装部件(包括电器和元件)的耐腐蚀、耐老化验证
- (1) 试验设备: 湿热箱。
- (2) 试验方法. 交变湿热试验要求严酷等级为温度 55°C , 循环 6 次, 1 个变量。

在温度为 $(25 \pm 3)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 45%~75%的条件下, 使试验样品达到温度稳定之后, 在 1h 内将工作空间内的相对湿度升高到不小于 95%。试验周期见图 6.7-10、表 6.7-3。

表 6.7-3 试验周期			
试验阶段	温度 ($^\circ\text{C}$)	湿度 (%)	时间 (h)
初始温度	25 ± 2	95	1
升温阶段	$25 \pm 2 \rightarrow 55 \pm 2$	95	3
高温高湿恒定阶段	55 ± 2	93 ± 3	9
降温阶段	$55 \pm 2 \rightarrow 25 \pm 2$	95	3
低温高湿恒定阶段	25 ± 2	95	9
循环周期		6 次	

- 1) 升温阶段. 在 (3 ± 0.5) h 内, 将工作空间的温度升高到 55°C , 升温速度应限定在图 6.7-9 的阴影范围内。在该阶段, 除最后 15min 相对湿度可不低于 90% 外, 其余时间

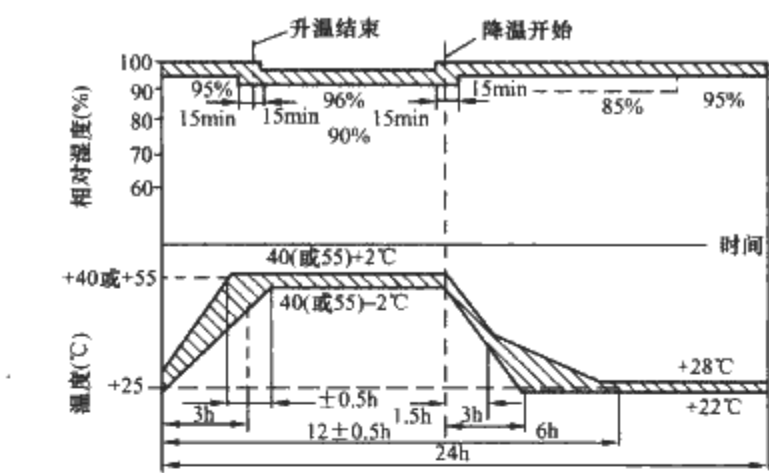


图 6.7-10 试验周期

- 的相对湿度都不低于 95%，以使试验样品产生凝露。
- 2) 高温高湿恒定阶段. 将工作空间的温度维持在 $(55 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的范围内, 直到从升温阶段开始算起满 (12 ± 0.5) h 为止。在该阶段, 除最初和最后 15min 相对湿度可不低于 90% 外, 其余时间均应为 $93\% \pm 3\%$ 。
- 3) 降温阶段. 将工作空间的温度在 3~6h 内由 $(55 \pm 2)^\circ\text{C}$ 降至 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。降温速度应限定在图 6.7-10 的阴影范围内。应该注意的是, 在降温开始后的 1.5h 内的降温速度是在 $3\text{h} \pm 15\text{min}$ 内, 温度由 $(55 \pm 2)^\circ\text{C}$ 降至 $(25 \pm 3)^\circ\text{C}$ 的降温速度。在该阶段, 相对湿度有两种变化方式:
- 变化 1: 除最初 15min 相对湿度应不低于 90% 外, 其余时间均应不低于 95%。
- 变化 2: 允许相对湿度不低于 85%。
- 4) 低温高湿恒定阶段. 将工作空间的温度维持在 $(25 \pm 3)^\circ\text{C}$, 相对湿度应不低于 95%, 直至从升温阶段开始算起满 24h 为止。
- (3) 试验结果的判断: 试验后, 如未出现肉眼可见的锈斑、裂纹和其他损坏, 则认为通过了此试验。但是防护层表面的蚀斑是允许的。

3.5.2 用合成材料制作的或用金属材料制作但完全由合成材料涂覆的外装部件的耐腐蚀、耐老化验证

- (1) 试验设备: 氙灯耐候试验箱。
- (2) 试验方法: 用合成材料制作的或用金属材料制作但完全由合成材料涂覆的外部部件, 应经受 UV (紫外线) 试验方法, 用氙灯进行 17 次循环, 总的试验周期为 500h, 喷雾循环 5~25 次。

- 1) 试样选择: 见表 6.7-4。

表 6.7-4 试样选择				
试样材料	试样类型	试样制备方法	试样最佳厚度 (mm)	试验速度
硬质热塑性塑料、热塑性增强塑料	I 型	注塑成型、压制成型	4	B、C、D、E、F
硬质热塑性塑料、板热固性塑料板 (包括层压板)		机械加工	4	A、B、C、D、E、F、G
软质热塑性塑料、软质热塑性塑料板	II 型	注塑成型压制成型板材机械加工、板材冲切加工	2	F、G、H、I
热固性塑料, 包括经填充和纤维增强的塑料	III 型 ^①	注塑成型、压制成型	—	C
热固性增强塑料板	IV 型	机械加工	—	B、C、D

① III 型试样仅用于测定拉伸强度。

2) 试验类型、尺寸和要求:

- a. 4 种类型的试样: ① I 型试样见图 6.7-11, I 型试样要求见表 6.7-5; ② II 型试样见图 6.7-12, II 型试样要求见表 6.7-6; ③ III 型试样见图 6.7-13, III 型试样要求见表 6.7-7; ④ IV 型试样见图 6.7-14, IV 型试样要求见表 6.7-8。
- b. 建议仲裁试验时, II 型试样厚度采用 4mm。
- c. 试样厚度除表中规定外, 板材厚度 $d \leq 10\text{mm}$ 时, 可用原厚为试样厚度; 当厚度 $d > 10\text{mm}$ 时, 应从两面等量机械加工至 10mm, 或按产品标准规定加工。
- d. 每组试样不少于 5 个。对各向异性的板材应分别从平行于主轴和垂直于主轴的方向各取一组试样。

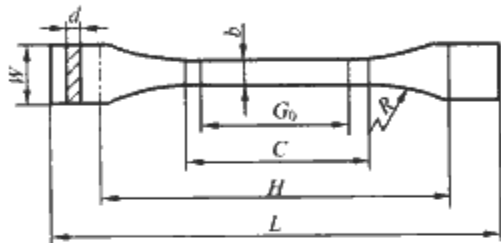


图 6.7-11 I 型试样

表 6.7-5 I 型试样要求

符号	名 称	尺寸(mm)	公差(mm)
L	总长(最小)	150	—
H	夹具间距离	115	±5.0
C	中间平行部分长度	60	±0.5
G ₀	标具(或有效部分)	50	±0.5
W	端部宽度	20	±0.2
d	厚度	—	—
b	中间平行部分宽度	10	±0.2
R	半径(最小)	60	—

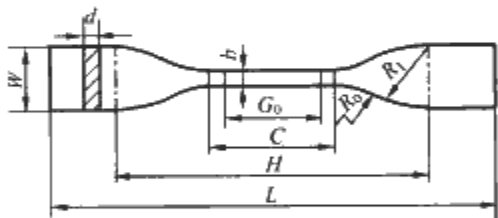


图 6.7-12 II 型试样

表 6.7-6 II 型试样要求

符号	名 称	尺寸(mm)	公差(mm)
L	总长(最小)	115	—
H	夹具间距离	80	±5
C	中间平行部分长度	33	±2
G ₀	标距(或有效部分)	25	±1
W	端部宽度	25	±1
d	厚度	—	—
b	中间平行部分宽度	6	±0.4
R ₀	小半径	14	±1
R ₁	大半径	25	±2

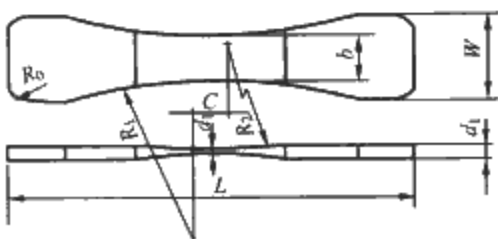


图 6.7-13 III 型试样

表 6.7-7 III 型试样要求

符号	名 称	尺寸(mm)
L	总长	110
C	中间平行部分长度	9.5
d ₀	中间平行部分厚度	3.2
d ₁	端部厚度	6.5
W	端部宽度	45
b	中间平行部分宽度	25
R ₀	端部半径	6.5
R ₁	表面半径	75
R ₂	侧面半径	75

注 尺寸公差为±5%。

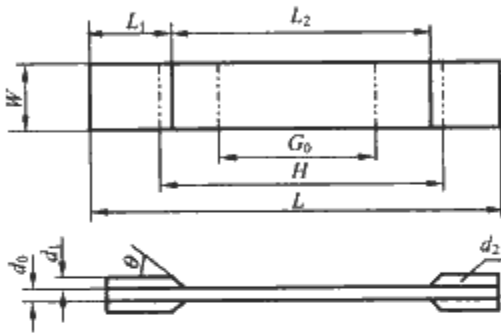


图 6.7-14 IV 型试样

表 6.7-8 IV 型试样要求

符号	名 称	尺寸(mm)	公差(mm)
L	总长(最小)	250	—
H	夹具间距离	170	±5
G ₀	标距(或有效部分)	100	±0.5
W ^①	宽度	25 或 50	±0.5
L ₂	加强片最小长度	50	—
L ₁	加强片间长度	150	±5
d ₀	厚度	2~10	—
d ₁	加强片厚度	3~10	—
θ ^②	加强片角度	5°~30°	—
d ₂ ^③	加强片	—	—

- ① 纱布增强的热固性塑料板试样宽度采用 50mm。玻璃纤维增强的热固性塑料板试样宽度采用 25mm。
- ② 随着加强片厚度的增加, θ 角度需相应增大。
- ③ 除有争议外, 对玻璃纤维增强材料可省去加强片。

3) 试验速度。设有以下 9 种:

- 速度 A (1±0.5)mm/min。
- 速度 B (2±0.4)mm/min。
- 速度 C (5±1)mm/min。
- 速度 D (10±2)mm/min。
- 速度 E (20±2)mm/min。
- 速度 F (50±5)mm/min。
- 速度 G (100±10)mm/min。
- 速度 H (200±20)mm/min。
- 速度 I (500±50)mm/min。

- a. 试验速度应从表 6.7-4 内与各种试样类型所对应的试验速度范围内选取。该试验速度应为使试样能在 0.5~5min 试验时间内断裂的最低速度。
- b. 允许按产品标准的规定或由双方商定另选其他试验速度。

4) 试验步骤。试验应按以下步骤进行:

a. 在试样中间平行部分做标线示明标距, 此标线对测试结果不应有影响。

b. 在试样中间平行部分的宽度和厚度, 精确至 0.01mm。Ⅱ型试样中间平行部分的宽度, 精确至 0.05mm。每个试样测量 3 点, 取算术平均值。

c. 夹具夹持试样时, 要使试样纵轴与上、下夹具中心连线相结合, 并且要松紧适宜, 以防止试样滑脱或断在夹具内。

d. 选定试验速度, 进行试验。

e. 记录屈服时的负荷, 或断裂负荷及标距间伸长。若试样断裂在中间平行部分之外时, 此试样作废, 另取试样补做。

5) 结果的计算和表示:

a. 拉伸强度、拉伸断裂应力、拉伸屈服应力或偏置屈服应力应按式 (6.7.2) 计算, 即

$$\sigma_t = \frac{p}{bd} \quad (6.7-2)$$

式中: σ_t 为拉伸强度、拉伸断裂应力、拉伸屈服应力或补偏置屈服应力, MPa; p 为最大负载或断裂负载或屈服负载或偏置屈服负载, N; b 为试样宽度, mm; d 为试样厚度, mm。

b. 断裂伸长率按式 (6.7-3) 计算, 即

$$\epsilon_t = \frac{G - G_0}{G_0} \times 100 \quad (6.7-3)$$

式中: ϵ_t 为断裂伸长率, %; G_0 为试样原始标距, mm; G 为试样断裂时标线间距离, mm。

举例: 试验样块为Ⅰ型试样, 见图 6.7-11, 试样厚度 $d=5\text{mm}$, 宽度 $b=10.05\text{mm}$, 标距 $G_0=50\text{mm}$ 。

a. 试样初始 (未进行氙灯) 试验

试验断裂负荷 $p=3390\text{N}$, 尺寸 $233\sim 247\text{mm}$ 。

a) δ_t (拉伸断裂应力) $= p/bd = (3390/10.05 \times 5)\text{MPa} = 67.46\text{MPa}$

b) ϵ_t (断裂伸长率) $= (247 - 233/50) \times 100\% = 28\%$

b. 试样经氙灯试验

试样厚度 $d=4.98\text{mm}$, 宽度 $b=10.06\text{mm}$, 标距 $G_0=50\text{mm}$ 。

试验断裂负荷 $p=2590\text{N}$, 尺寸 $233\sim 244\text{mm}$ 。

a) δ_t (拉伸断裂应力) $= p/bd = (2590/10.06 \times 4.98)\text{MPa} = 51.70\text{MPa}$

b) ϵ_t (断裂伸长率) $= \epsilon_t = \frac{G - G_0}{G_0} \times 100\% = (244 - 233/50) \times 100\% = 22\%$

保留的抗拉强度为 $22/28=79\%$ 。

保留的延伸率为 $51.7/67.46=77\%$ 。

每组试验不得少于 5 个 (5 组试验数据)。

(3) 试验结果判定: 验证固态合成材料在以上试验后, 保留了至少 70% 的抗拉强度和延伸率, 则认为通过了试验。

3.5.3 带有或没有金属或合成材料防护层的金属材料制作的外装部件的耐腐蚀、耐老化验证

(1) 试验设备: 二氧化硫/盐雾腐蚀试验箱。

(2) 试验方法:

1) 将试品暴露在中性盐雾中, 浓度为 $(5 \pm 1)\%$, 试验箱温度维持在 $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$; 时间 7d (168h)。

2) 经过以上试验后, 取出试品, 放在 SO_2 气密, SO_2 的体积浓度为 0.067%。5d (120h) 循环地放在 SO_2 气体中暴露 8h, 此其间温度上升至 $(40 \pm 3)^\circ\text{C}$, 然后间歇 16h, 并且外壳的门是打开的, 暴露时间总共 40h, 间歇时间总共 80h。

3) 在 12d 后, 用离子水冲洗样品。

4) 试验包括两个相同的 12 天周期。

(3) 试验结果判定: 试验后, 如没有肉眼可见的锈斑、裂纹和其他损坏, 则认为通过了此试验。注意防护层表面的蚀斑是允许的。

3.6 连接线、通电操作

见第 2 章。

3.6.1 元器件选择

见第 2 章。

3.6.2 母线与绝缘导线

见第 2 章。

3.6.3 防护措施验证

(1) 用作临时通道的开口, 当临时电缆接好时, 防护等级至少为 IP23C。

(2) 电缆分线箱外壳防护等级至少为 GB 4208—1998 中的 IP34D。

(3) 电缆分线箱要提供安全可靠的闭锁机构, 门、盖板或遮板应设计成一旦锁闭, 不会因为地面适度下陷或车辆来往的振动而被打开。

其他见第 2 章。

3.6.4 装置结构与安装检查

(1) CDCs 可配有开口, 以便于电缆的临时连接。

(2) CDCs 需要沉埋入地的部位应能承受来自安装和正常使用施加于它的应力。

(3) 对有碍清除积雪的 CDCs 要做出标记。

(4) CDCs 的出线单元的结构应使其能够借助于制造厂推荐的设备可靠地进行挂地线或短接, 以保证该成套设备的所有部件保持制造厂指定的防护等级。

其他见第 2 章。

3.6.5 铭牌、标志的检查

见第 2 章。

第 8 章 低压成套开关设备和控制设备空壳体试验

1 简述

本章所述的试验方法、检测技术主要是用于低压成套开关设备和控制设备空壳体（该壳体是用户还没有在内部安装开关设备和控制元件之前的产品）的试验。基本上能满足目前低压成套开关设备和控制设备空壳体的检测要求。本试验不适用于其他专用产品标准所提及的壳体（如 IEC60670）。主要依据 IEC62208 Empty enclosures for Low-voltage switchgear and controlgear assemblies General requirements; IEC62208《低压成套开关设备和控制设备空壳体的一般要求》；GB/T 20641—2006《低压成套开关设备和控制设备空壳体的一般要求》。

2 型式试验项目

静负载、提升、金属插件轴向负载的试验、外部机械撞击防护等级试验（IK 代码）、防护等级试验（IP 代码）、绝缘材料的性能、介电强度试验、保护电路连续性检测、耐老化试验、耐腐蚀试验、标志。

3 试验环境条件

如无其他规定，试验应在（20±5）℃的大气温度下进行试验。

4 试验方法

装置的防护等级试验、保护电路连续性检测的试验方法见第 2 章。

试验的壳体应按照壳体制造厂的说明按正常使用方式进行安装。

表 6.8-1 所示为被试样品数量、试验项目和每件试验样品的顺序。

表 6.8-1 被试样品数量、试验项目和试验顺序

章条号	试 验	样品 1	样品 2	样品 3	代表性 样品
4.1	静负载	1			
4.2	提升	2			
4.3	金属插件轴向负载验证	3			
4.4	外部机械撞击防护等级验证(IK 代码)	4			
4.5	防护等级验证(IP 代码)	5			
4.6.1	热稳定验证		1		
4.6.2	耐热性验证		2		
4.6.3	耐受非正常发热和火焰的验证		3		
4.7	介电强度验证	6			
4.8	保护电路连续性验证	7		2	
4.9	耐老化验证				
4.10	耐腐蚀验证			1	
4.11	标志	8			

4.1 静负载

4.1.1 试验仪器设备

试验仪器设备为各种规格的模拟负载。

4.1.2 试验方法

（1）负载质量：制造厂规定的壳体内部和门上的最大允许负载乘以 1.25 倍。

（2）加载方式及时间：负载均匀排列在安装板或开关设备和控制设备支撑上以及门上，持续时间 1h。

（3）对于绝缘材料外壳和带绝缘材料部件（铰链、锁等）的金属壳体，应在 70℃的大气温度下进行试验。加载质量、方式及时间同金属外壳。但对绝缘材料壳体的门开启、关闭试验，可在加热箱（室）外面的周围空气温度下进行。

试验后，将关闭的门打开至 90°保持 1min，共应进行 5 次开闭试验。

4.1.3 试验结果判定

试验负载仍保持在原位置，壳体应没有裂痕和永久变形，试验期间不应有任何削弱其特性的挠度。满足以上要求为合格。

4.2 提升

4.2.1 试验仪器设备

试验仪器设备为各种规格的模拟负载、提升装置（吊车）。

4.2.2 试验方法

本试验仅适用于带提升装置的壳体。

按 4.1 所述，壳体装入负载并将门关好，然后用提升装置按照制造商规定的方法将其提起。将壳体从水平位置垂直向上提升，然后放回水平位置，提升高度为 1m±0.1m，保持不动悬吊 30min。共进行 3 次试验。

然后再将壳体提升 1m±0.1m，水平匀速移动 10m±0.5m，然后放下。移动时间为 1min±5s。重复操作 3 次。

4.2.3 试验结果判定

试验后壳体没有裂痕和永久变形，试验期间不应有任何削弱其特性的挠度。满足以上要求为合格。

4.3 金属插件轴向负载的验证

4.3.1 试验仪器设备

试验仪器设备为各种规格的负载。

4.3.2 试验方法

本项试验仅适于在安装板上和开关设备或控制设备的支撑上安装有金属插件的壳体。

试验应在一个有代表性的样品上施加表 6.8-2 给出的轴向负载 10s。

表 6.8-2 试验所加轴向负荷

插件尺寸 M ^①	轴向负载 (N)	插件尺寸 M ^①	轴向负载 (N)
M4	350	M8	500
M5	350	M10	800
M6	500	M12	800

① M 为公制螺纹尺寸。

试验期间，壳体应完全安放在一个支撑平台上，以允许施加上述负载。

4.3.3 试验结果判定

试验结束时，插件应保持其原位置，不能有任何移动痕迹。不允许有任何材料破裂，包括插件。试验前可看见的小裂痕和气泡不影响轴向负载的使用，可忽略不计。

4.4 外部机械冲击防护等级的验证（IK 代码）

4.4.1 试验仪器设备

设备为冲击试验锤，见图 6.5-1。

表 6.8-3 IK 代码与撞击能量和下落高度之间的关系

IK 代码	IK00	IK01	IK02	IK03	IK04	IK05	IK06	IK07	IK08	IK09	IK10
撞击能量 (J)	a	0.14	0.2	0.35	0.5	0.7	1	2	5	10	20

a 根据本章所依据的标准不需防护

注 1. 当要求较高撞击能量时，建议撞击能量值为 50J。
2. 选用一个两位特征数组，以避免与用单数表示特殊撞击能量的某些国家标准相混淆。

表 6.8-4 撞击能量与撞击锤质量和下落高度之间的关系

撞击能量 (J)	0.14	0.2	0.35	0.5	0.7	1	2	5	10	20	50
撞击锤质量 (kg)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.5	1.7	5	5	10
下落高度(1±0.01)mm	56	80	140	200	280	400	400	300	200	400	500

注 1. 当要求较高撞击能量时，建议撞击能量值为 50J。
2. 选用一个两位特征数组，以避免与用单数表示特殊撞击能量的某些国家标准相混淆。

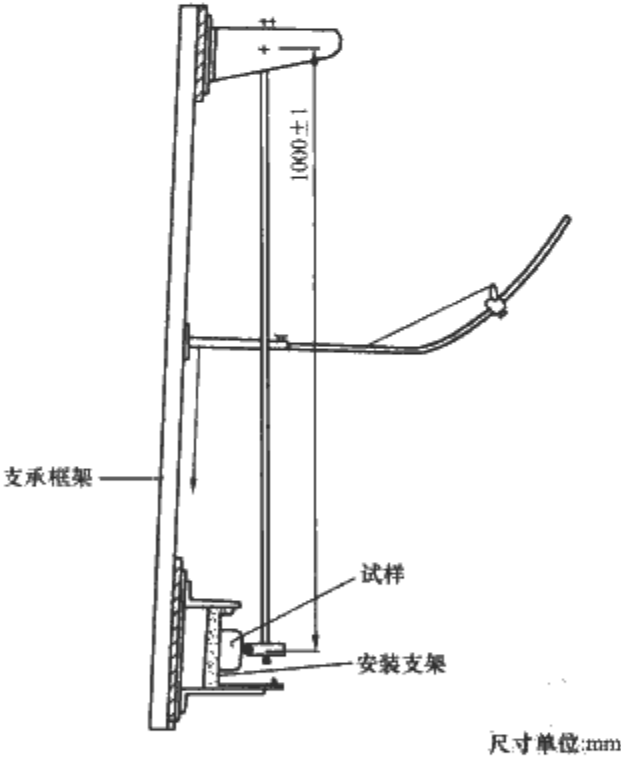


图 6.8-1 冲击试验锤

4.4.3 试验结果判定

试验后，壳体 IP 代码和介电强度不变；可移式覆板可以移开和装上，门可以打开和关闭为合格。

进行防护等级验证时，如果壳体太大，允许仅进行第二位特征数字所述进水的防护等级验证和附加数字所述危险部件的防护等级验证。

如果规定了防护空间，允许由于撞击引起的一些挠度。

4.5 绝缘材料性能

4.5.1 热稳定验证

对于没有技术意义，只用于装饰目的的部件不进行此项试验。

4.4.2 试验方法

外部机械冲击防护等级验证应根据表 6.8-3 和表 6.8-4 的规定，用适合壳体尺寸的试验锤进行试验。各种试验锤的尺寸、质量见 IEC 60068-2-75。

壳体应像正常使用一样固定在刚性支撑体上。

应按表 6.8-3 施加撞击能量，并且：①对最大尺寸不超过 1m 的正常使用的每个外露冲击 3 次；②对最大尺寸超过 1m 的正常使用的每个外露冲击 5 次。

壳体部件（如铰链、锁等）不进行此试验。

该撞击应平均分布在壳体的表面。

如果加热箱（室）的容积与壳体尺寸不匹配，试验可在一个有代表性的样品上进行。

(1) 试验仪器设备：高温试验箱，温度范围为 0～100℃。

(2) 试验方法：

1) 将试品如正常使用时一样放置在高温试验箱内。

2) 试验温度：(70±2)℃。

3) 试验时间：7 天 (168h)。

试验后将试品移出高温试验箱置于环境温度下，相对湿度在 45%～55%之间，至少放置 4 天 (96h)，目测壳体或样品应没有可见的裂缝或无新裂缝，其材料不应变为黏性或油脂性。在食指上裹一片干粗布，用 5N 力按压样品进行判断。

5N 的力可用下面方法获得：将壳体或者样品放在天平的秤盘上，天平的另一侧秤盘加载的质量等于样品质量 + 500g。在食指上裹一片干粗布按在样品上使天平平衡。

(3) 试验结果判定：试验后，样品和壳体材料上应没有布的痕迹，或样品和布不相粘连。

4.5.2 耐热性验证

(1) 试验仪器设备：高温试验箱、球压试验装置。

(2) 试验方法：壳体可用图 6.5-2 所给的仪器进行球压试验。

从壳体上取至少 2mm 厚的一块板，如果不行，则从壳体上取 4 片较薄的板叠在一起，达到试验样品的最薄厚度 2.5mm。为防止球将板穿透，试验样品的厚度可增加到 2.5mm。

将被试样品水平放置，用一个直径为 5mm 的钢球对该表面施加 20N 的力。

在温度为 (70±2)℃ 的加热试验室中进行试验，1h 后将球从样品上移开，然后马上将样品浸泡在冷水中，10s 内

冷却到接近室温。

(3) 试验结果判定: 测量球压痕迹的直径不能超过 2mm。

4.5.3 耐受非正常发热和火焰的验证

(1) 试验仪器设备: 灼热丝试验仪。

(2) 试验方法: 进行该项试验时, 如果壳体尺寸与试验设备不匹配, 可在样品上进行试验。该样品必须是从壳体最薄弱的地方获取。如果对试验存有疑问, 应在两个新样品上进行重复试验。

1) 预处理: 试验开始之前, 将样机置放于温度为 15~35℃ 之间, 相对湿度在 35%~45% 之间的大气中 24h。

2) 试验样品放在密闭不通风的暗室里, 以便可以看到试验过程中出现的火花。

3) 试验开始前, 校准试验装置的温度测量系统。温度测量系统校准温度为 960℃, 标准方法是用纯度为 99.8%、厚 0.06mm、边长 2mm 的正方形铝箔放在灼热丝顶部的上表面。当灼热丝加热到使铝箔融化时, 温度为 960℃。

4) 试验程序: 进行试验时, 应采取人身安全保护措施, 注意防止: ① 燃烧和爆炸的危险; ② 烟雾和 (或) 有毒产物的吸入; ③ 有毒的残余物。

a. 试验样品的固定不应由于支撑或紧固而明显散热。试验样品的安装应保证: ① 与灼热丝顶部的接触面保持垂直; ② 灼热丝顶部施加在和正常使用时可能会遭受到热应力相同的那部分试验样品表面。

如果在设备正常使用期间没有详细规定遭受热应力的地方, 灼热丝顶部应施加在试验样品最薄处, 而且离试验样品上缘最好不少于 15mm。

b. 试验前, 必须清除灼热丝顶部上前次受试材料的残余物, 例如使用钢丝刷。

c. 灼热丝通电并加热到规定的温度: 用于安装载流部件的部件为 $(960 \pm 15)^\circ\text{C}$; 用于安装在嵌入墙内的部件为 $(850 \pm 15)^\circ\text{C}$; 不用于安装载流部件的所有其他部件, 包括接地端子和嵌入不易燃烧的墙内的部件为 $(650 \pm 15)^\circ\text{C}$ 。

以上温度是用校准过的热电偶测量, 试验开始前, 应注意确保这一温度和加热电流至少恒定 60s 时间, 并且在加热和校准期间采取保持一定距离或使用适当的屏蔽, 使试验样品不受热辐射的影响。

d. 使灼热丝顶部与试验样品接触时间为 $(30 \pm 1)\text{s}$, 这期间加热电流应保持恒定。此后将灼热丝和试验样品慢慢分开, 避免试验样品进一步受热和有任何空气流动而影响试验结果。

灼热丝压入试验样品的深度应采用机械的方式限制为 7mm。

e. 在使用灼热丝期间和之后 30s 期间内, 应观察样机以及样品周围的部件和铺在样品下面的绢纸。

记录灼热丝使用期间或使用以后样品点燃的时间和火光熄灭的时间。

(3) 试验结果判定。如果为下列情况, 则认为样品能耐灼热丝试验:

- 1) 没有明显的火花和持续不断的亮光。
 - 2) 样品的火光在移开灼热丝 30s 之内熄灭。
- 绢纸不应燃烧, 松木板不应烧焦。

注意: 根据生产厂与用户之间的协议, 可以使用更高的温度, 更短的火焰熄灭时间和不同的施加时间。

4.6 介电强度验证

4.6.1 试验仪器设备

(1) 湿热试验箱: 温度 0~50℃; 湿度 90%~95%。

(2) 工频耐压机: 交流电源应具有足够的功率以维持试验电压, 可以不考虑漏电流。此试验电压实际应为正弦波, 而且频率在 45~62Hz 之间。

4.6.2 试验方法

本试验仅适于绝缘材料制作的壳体。

合格检验如下:

(1) 预处理: 将壳体置于相对湿度为 91%~95%, 空气温度保持在 $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的湿热箱内。壳体在室内放置 2d (48h)。

在大多数情况下, 壳体在进行潮湿试验前先放置在规定的温度下至少 4h, 91%~95% 之间的相对湿度可通过将硫酸钠或硝酸钾饱和溶液放在室内获得, 水面与空气有足够大的接触面。

为了得到规定的室内条件, 需要确保室内空气经常循环, 一般使用隔热的试验室。

(2) 防护空间内不带金属部件的壳体: 在两片金属箔之间按照本章常规试验 3 规定施加实际正弦波的方均根电压值 1min, 一片金属箔贴在壳体外表面, 另一片金属箔贴在壳体内表面。

开始施加不到 1/2 的规定电压值, 然后迅速升至全值。

(3) 防护空间内带金属部件的壳体: 所有内部金属部分连接到一个母排上, 在连接外部表面的金属箔和母线之间按照本章常规试验 3 的规定施加正弦波方均根电压值 1min。

开始时施加不到 1/2 的规定电压值, 然后迅速升至全值。

注意: 在壳体外部表面需要一个孔, 使电压可以连接到母排上, 要考虑母排和外部表面之间的电气间隙和爬电距离。

4.6.3 试验结果判定

试验过程中样品不应有影响未来使用的损坏, 不应发生击穿闪络。

4.7 耐老化验证

4.7.1 试验仪器设备

试验仪器设备为氙灯耐气候试验箱、冲击试验装置、灼热丝试验仪。

4.7.2 试验方法

用合成材料制作的或用金属制作但完全用合成材料涂覆的外装部件应依据 GB/T 16422.2—1999 中方法 A 进行 UV (紫外线) 试验:

每次喷水时间: 5min。

两次喷水之间的无水时间 (用氙灯烤干): 25min。

循环进行共 500h。

试验的温度和湿度值分别为 $(65 \pm 3)^\circ\text{C}$ 和 $(65 \pm 5)\%$, 除非制造商有其他规定。

试验结束后将样品移出试验箱, 进行如下检查:

(1) 验证合成材料的抗弯度: 氙灯试验后, 验证合成材料的抗弯度是否符合至少为 70% 的耐老化试验前的数值。进行该项试验时, 暴露在 UV 下的样品应表面朝下, 并在非暴露的表面施加压力。

(2) 验证摆锤冲击强度: 耐老化试验后, 验证合成材料的冲击强度是否符合至少为 70% 的耐老化试验前的数值。

进行该项试验时,采用无缺口试样且冲击力施加在暴露面上。

(3) 耐老化试验后样品还应进行 4.5.3 灼热丝试验,并符合相应的规定。

(4) 检查金属壳体的防护涂层至少应保留耐老化试验前的 50%。

4.7.3 试验结果判定

样品应没有破裂和损坏为合格。

4.8 耐腐蚀验证

4.8.1 试验仪器设备

试验仪器设备为高低温交变湿热试验箱、盐雾试验箱。

4.8.2 试验方法

金属壳体和绝缘壳体及两者结合壳体的外部金属部件应进行试验,以验证防护层是否耐腐蚀。如果不可能在壳体上进行这些试验,可在同样结构(如:材料、厚度、涂层等)的壳体部件上进行,在所有情况下,铰链、锁和紧固件应进行试验。

进行试验的壳体应按照制造商的说明书像正常使用一样安装。壳体和样品应是新的、干净的。对于特殊使用条件,可根据用户和制造商的协议采用其他规定,例如 GB 7251.5—1998 中 8.2.11。

壳体应进行下列试验:

(1) 户内安装的壳体或金属部件或户外安装的壳体内部部件,应按照 GB/T 2423.4 中的 Dd 进行湿热周期试验,温度 40℃,相对湿度 95%;试验以 24h 为一个周期,共进行 6

个周期。还应按照 GB/T 2423.17 中的 Ka 进行盐雾试验,温度 (35±2)℃,24h 为一个周期,共进行 2 个周期。

(2) 户外安装的壳体或金属部件,应按照 GB/T 2423.4 中的 Dd 进行湿热周期试验,温度 40℃,相对湿度 95%;24h 为一个周期,共进行 12 个周期。还应按照 GB/T 2423.17 中的 Ka 进行盐雾试验,温度 (35±2)℃,24h 为一个周期,共进行 14 个周期。

4.8.3 试验结果判定

试验后,开启水龙头对壳体和样品冲洗 5min,用蒸馏水或软化水漂洗,再甩动或用吹风机除去水珠,然后将试验样品存放在正常使用条件下 2h。

进行外观检查以确保:①没有锈痕、破裂或其他损坏,但允许保护涂层表面的损坏;②密封没有损坏;③门、铰链、锁、紧固件和入门设施没有不正常的影响。

还应检查壳体的不同裸露导电部件是否有效地与保护导体连接。

4.9 标志

4.9.1 试验仪器设备

材料为布、汽油。

4.9.2 试验方法

用一块在水中浸泡的布,摩擦标志 15s,再用汽油中浸泡过的布摩擦标志 15s。

浇铸或冲压制作的标志不经受本试验。

4.9.3 试验结果判定

试验后标志应容易辨认。

第 9 章 高压/低压预装式变电站试验

1 简述

本章所阐述的试验方法、检测技术主要是用于高压/低压预装式变电站（以下简称预装式变电站），包括公众能接近的户外预装式变电站、部分或全部在地下安装的预装式变电站的试验和检测，包含高压/低压预装式变电站的主要试验及检测。主要依据 GB/T 17467—1998《高压/低压预装式变电站》DL/T 537《高压/低压预装式箱式变电站选用导则》标准。

2 型式试验项目

绝缘试验、温升试验、接地回路额定短时耐受电流及峰值耐受电流试验、操作系统功能检查、防护等级试验、外壳耐受机械应力试验、评估内部故障电弧效应试验、噪声试验。

3 试验方法

装置的防护等级试验的试验方法见第 2 章。

3.1 绝缘试验

3.1.1 试验设备

- (1) 雷电冲击设备：冲击电压 0~250kV；工频电压 100kV；直流电压 100kV。
- (2) 兆欧表：电压 500/1000V；电阻 0.3~1000MΩ；精度±5%。
- (3) 工频耐压机：高压 0~100kV；低压 0~5kV；精度±5%。
- (4) 游标卡尺：测量范围 0~200mm；精度 0.02。

3.1.2 试验方法

由于预装式变电站内的元件已按相应标准进行了型式试验，本条只适用于元件间受安装条件影响的内部连接线的绝缘能力。

(1) 试验部位：高压开关设备和变压器间的连接线；变压器和低压开关设备间的连接线。

(2) 试验方法：

1) 高压连接线的试验：

a. 通用条件：绝缘试验可以将变压器用能重现变压器套管的电场结构的复制品代替后进行。进行试验时，高压连接线通过高压开关设备连接到试验电源，只有串联在电源回路中的开关装置是闭合的，其他开关装置则是打开的。

电压限制装置应断开，像正常运行时一样接入，电流互感器的二次端子应短路并接地。电压互感器应断开。

当高压连接线是由和经过型式试验的带接地屏蔽的接头连接的高压电缆，或是由其他型式的端子（该端子在预装式变电站的安装条件下，在高压开关设备和变压器的高压侧已通过型式试验）相连的高压电缆组成时，不需进行绝缘试验。

b. 试验电压的施加：

a) 施加在高压连接线上：施加电压时，应将主回路每

相的导体依次连接到试验电源的高压端子。主回路和辅助回路的所有其他导体应该接到框架的接地导体上，并和试验电源的接地端子相连。

b) 对于绝缘材料的外壳：为了检验高压开关设备和控制设备与变压器间的无屏蔽的高压连接线和外壳的可触及的表面之间的绝缘，应在它可触及的一侧覆盖一个圆形或方形的金属箔，面积应尽可能大，但应不超过 100cm²，并应接地。金属箔应放在对试验最不利的位置，如果对何处最为不利有怀疑，则试验应在不同的位置上重复进行。

在与高压开关设备和变压器间的无屏蔽连接线相对的非导电材料外壳的内表面上覆以上所述的金属箔，并将金属箔接地，在高压连接线和接地金属箔间应承受 150% 额定电压、持续时间 1min 的工频耐受电压试验。

c. 试验电压按表 6.9-1。

表 6.9-1 高压连接线的绝缘水平试验电压值

额定电压 (有效值) (kV)	最高电压 (有效值) (kV)	雷电冲击耐受电压 (峰值) (kV)				1min 工频耐受电压 (有效值) (kV)			
		对地、相间 及普通断口		隔离断口		对地、相间 及普通断口		隔离断口	
		I	II	I	II	I	II	I	II
3	3.5	20	40	23	46	10	18	12	20
6	6.9	40	60	46	70	20	23	23	26
10	11.5	60	75	70	85	28	30	32	34
15	17.5	75	105	85	120	38	40	45	47
20	23		125		145		50		60
35	40.5		185		215		80		90
63	69		325		275		140		160
110	126		450		500		185		210
220	252		850 950		950 1050		360 395		415 460

注 表中栏 I 适用于装置中有过电压保护、避雷器保护的装置。

d. 雷电冲击电压试验：设备的高压连接线应进行雷电冲击电压试验，试验电压按表 6.9-1；用正极性和负极性的标准雷电冲击电压波 1.2/50μs 来进行。

通常应进行 15 次冲击耐受试验。对每一极性，应在额定耐受电压下连续进行 15 次雷电冲击试验。

如在每一极性 15 次连续的冲击试验中，自恢复绝缘上发生的破坏性放电不超过 2 次，而在非自恢复绝缘上没有发生破坏性放电，则认为高压连接线通过了试验。

在非自恢复绝缘占主导地位场合，可以采用惯用的冲击电压耐受试验，以避免可能对固体绝缘的损害，雷电冲击试验时，冲击电压发生器的接地端子应连接到变电站外壳的接地导体上。

冲击试验后，某些绝缘材料会残留一些电荷，改换极性时应注意用适当的方法来使绝缘材料放电，如在试验前先加较低电压的反极性冲击。

e. 工频耐压试验：高压连接线在干状态下进行工频电压耐受试验，施加电压时间 1min，施加耐压值参照表 6.9-1。工频耐压试验时试验变压器一端应接地并连接到变电站接地导体上。

进行工频耐压试验时如果没有发生破坏性放电，则认为试验通过。

2) 低压连接线的试验：

a. 通用条件：当低压连线部分或全部被非金属外壳覆盖时，非金属外壳应该用与框架相连的金属箔包覆在操作人员可能触及的所有表面上。

试验时，低压连接线通过低压开关设备连接到试验电源上，只有串联在电源回路中的开关装置是闭合的，所有其他开关装置都打开。

b. 试验方法：低压连接线应进行雷电冲击试验，对于低压成套开关设备和控制设备的额定冲击电压值选用见第 2 章。

试验时每一极性应施加 1.2/50μs 冲击电压 3 次，最小间隔时间 1s。

施加电压时，应将主回路每极的导体依次连接到试验电源的高压端子。主回路和辅助回路的所有其他导体应该连接到接地导体或框架上，并与试验电源的接地端子相连。

c. 试验结果判定：试验中不应发生破坏性放电，则认为试验通过。

3) 爬电距离的验证：应测量相与相间、不同电压回路的导体间以及带电部件和外露的导电部件间最短爬电距离。对于不同材料组别和污染等级测得的爬电距离应符合第 2 章中要求。或可根据实际应用符合表 6.9-2。

表 6.9-2 爬电距离允许值

额定绝缘电压或实际工作电压 交流方均根值 (V)	污染等级	材料组别	爬电距离值 (mm)
400	3	Ⅲa	6.3
500	3	Ⅲa	8.0
630	3	Ⅲa	10
800	3	Ⅲa	12.5

注 如果试品生产厂不能提供材料组别、污染等级数据时，低压成套设备应按材料组别Ⅲa、污染等级 3 来考虑。

4) 辅助回路的绝缘试验：见第 2 章。

3.2 温升试验

3.2.1 试验设备

双臂电桥，电阻 0.01mΩ~10Ω、精度 0.2 级；0.5 级交流电流表；热电偶；温度巡检仪，0~200℃、精度 0.2 级。

3.2.2 试验环境条件

10~40℃。

3.2.3 试验方法

电源连接时变压器和开关设备的元件应连接在一起，并把低压电缆的出线短接。电源应连接到高压的开关设备的进线端子。

施加试验电流时，在预装式变电站的回路中应通以足以产生变压器总损耗的电流。应通以比额定电流稍大的电流，以补偿变压器的空载损耗。

(1) 变压器温升试验：应对变压器液面和绕组（对于干式变压器，只测绕组）温升值进行测量。

1) 方法：对于油浸式变压器温升试验采用短路法，用

温度计及热电偶测量变压器顶层油温，用电阻法测量线圈的平均温升；对于干式变压器温升试验，采用电阻法测量线圈的平均温升。

下面以油浸式变压器为例：

首先测量变压器高低压侧冷态电阻值，然后施加总损耗电流 I_{all}

$$I_{all} = I_N (P_{all} / P_{load})^{1/2}$$

I_N 为电源侧额定电流。将预装式变电站连续运行，当油顶层温升达到每小时上升小于 1℃ 时，则认为温升已稳定，此时记录各部位的温升及温度，即油顶层温升、环境温度、散热器温升、进出口温升。

然后降低高压输入电流为额定值，维持恒定 1h 后，记录各部位的温升及温度同上。

切断电源，记录此时时间，并断开高压开关，测量变压器高压侧绕组电阻，记录热电阻随时间的变化曲线。

完成上述试验后合上高压开关，电源重新送电，调节施加变压器的电流为额定电流，维持恒定 1h 后，记录此时各部位温升及温度。

再次切断电源，重复测量热电阻过程，测量变压器低压侧绕组电阻，记录热电阻随时间的变化曲线。

其他见第 2 章。

2) 试验结果判定：变压器的温升超过同一变压器在无外壳的温升测量值，其差值不大于变电站的外壳级别，即 $\Delta t \leq 10, 20K$ 或 $30K$ ，则认为试验通过。用公式表示为

$$\Delta t = \Delta t_2 - \Delta t_1$$

式中： Δt_2 为变压器在外壳内部的温升； Δt_1 为变压器在外壳外部的温升。对级别 10， $\Delta t \leq 10K$ ；对级别 20， $\Delta t \leq 20K$ ；对级别 30， $\Delta t \leq 30K$ 。

(2) 低压开关设备和控制设备的温升试验：

1) 电源应接到预装式变电站的高压开关设备进线端，变压器和开关设备的元件连接在一起，低压侧短接。

低压成套设备中的某一电路的额定电流，由制造厂根据其内装电气设备额定值及其布置和应用情况来确定。

2) 低压成套开关设备和控制设备的温升试验方法及要求见第 2 章。

3.3 接地回路短时耐受电流及峰值耐受电流试验

3.3.1 试验设备

见第 2 章短路强度试验。

3.3.2 试验要求

(1) 预装式变电站内装的元器件，包括高压开关设备和控制设备及低压开关设备和控制设备，均应是经受短路耐受强度试验的合格产品。

(2) 预装式变电站接地回路短时耐受电流试验。预装式变电站保护电路包括用来连接接地系统的端子到每个元件的接地导体。接地导体应按 1s 短时电流不小于 6kA 设计，短路持续时间 1s 时应不超过 200A/mm²，短路持续时间为 3s 时应不超过 125A/mm²，其截面积应不小于 30mm²。如果短时电流大于 6kA 或持续时间大于 1s，则应在系统中性点接地的条件下，进行耐受额定短时和峰值耐受电流的试验。

额定电压为 10kV/400V 三相交流 50Hz、变压器容量 50~1600kVA 的预装式变电站的保护导体额定短时耐受电流 $I_{cw} = I_k$ （按选取值）、额定峰值耐受电流 $I_{PK} = 2.5I_{cw}$ 参见表 6.9-3。

表 6.9-3 短时耐受电流标准值

变压器容量 (kVA)	变压器短路阻抗 U_k					
	4%		4.5%		6%	
	短时耐受电流 I_k (kA)		短时耐受电流 I_k (kA)		短时耐受电流 I_k (kA)	
	标准值	选取值	标准值	选取值	标准值	选取值
50	1.8	2	1.604	1.6	1.2	1.25
100	3.6	4	3.208	3.15	2.4	2.5
160	5.77	6.3	5.132	4	3.85	4
200	7.2	8	6.415	6.3	4.81	5
250	9.025	10	8.019	8	6.015	6.3
315	11.375	12.5	10.104	10	7.58	8
400	14.4	16	12.83	12.5	9.63	10
500	18.05	20	16.038	16	11.03	12.5
630	22.75	25	20.207	20	14.86	16
800	28.85	31.5	25.66	25	19.26	20
1000	36.1	40	32.075	31.5	24.06	25
1250	45.125	50	40.094	40	30.08	31.5
1600	57.8	63	51.32	50	36.53	40

3.3.3 试验方法

试验方法见第 2 章。

3.3.4 试验结果判定

试验后，保护导体和到元件的接地连接线有些变形是允许的，但应保持保护电路的连续性。

3.4 操作系统功能试验

(1) 低压开关设备和控制设备的操作：应对低压开关设备和控制设备机械操动机构进行循环操作 50 次，其机械操动机构操作力应正常。

(2) 预装式变电站的门的机械操作：变电站高压室的门应设有机械联锁及解锁装置，要采取防触电措施，使操作者不会触及带电部分。

(3) 绝缘挡板的定位：为了提高相间和相对地间的绝缘水平加设的绝缘板，应有足够的机械强度和电气强度，并具有良好的抗老化性能和阻燃性。它的设置应保证相间和相对地间有较大的空气绝缘（例如：额定电压为 10kV，空气净距不小于 60mm，相间绝缘板应设置在中间的位置），否则由于电场强度的影响，将使绝缘板很快破坏。

(4) 变压器温度和液面的检查：变压器温度和液面的指示应便于查看，符合标准要求。

(5) 电压指示的检查：电压指示安装高度应便于查看。

(6) 接地线的连接：应提供一条连接变电站的每个元件的接地导体，与接地回路连接的元件包括变电站的金属外壳、高压开关设备和控制设备的金属外壳、金属屏蔽及高压电缆的接地导体、变压器的箱体或干式变压器的金属框架、低压开关设备和控制设备的金属框架或外壳、自控和遥控装置的接地导体。若预装式变电站外壳不是金属的，外壳的金属门和其他可触及的金属部件要和接地回路连接。

(7) 电缆的试验：为了进行电缆的绝缘试验，电缆的试验点应是便于连接的接线端子。

(8) 熔断器的更换：熔断器安装应便于更换。

(9) 验证高压开关设备内不同的元件之间的联锁功能。

为了保证可靠运行和操作者安全，高压开关设备应具有下列功能：防止带负荷分合隔离开关，防止误合断路器、负荷开关，防止接地开关处于闭合位置时合断路器、负荷开关等开关，防止带电时误合接地开关，防止误入带电隔室，只有当断路器、负荷开关处在分闸位置时，隔离开关才可以进行分、合闸操作，如果隔离开关本身带有接地开关，则要有联锁，保证它们动作的正确性。

3.5 防护等级验证

预装式变电站外壳的防护等级应不低于 IP23D。

其他见第 2 章。

3.6 外壳耐受机械应力的试验

3.6.1 试验设备

试验设备包括载重负载（满足试验需要）和撞击试验装置。

3.6.2 试验方法

预装式变电站的外壳应有足够的机械强度，并应耐受以下的负载和撞击：

(1) 顶部负载：最小值为 2500N/m²（竖立负载或其他负载）；在车辆通行处（例如停车场）的地下安装变电站顶部，最小值为 50kN，作用在 600cm²的表面上（830kN/m²）；雪负载（根据当地气候条件确定）。

(2) 抵抗外部机械撞击试验：该试验通常在预装式变电站外壳外露部分的薄弱点（例如面板、门和通风口）上进行，撞击能量为 20J。对于水平表面，可以用垂直放置的管子给打击元件导向。

如果在正常使用条件下，温度的变化对外壳部件所用材料（例如合成材料）的机械撞击强度有显著的影响，撞击试验应在最低使用温度下在这些部件上进行。

试验时，外壳应按制造厂的使用说明书安装。

在预装式变电站的每一立面上或顶部，最多的撞击次数为 5 次。在同一位置（点）只撞击 1 次。

满足以下判据时，认为试验成功：

- 1) 应保持外壳的防护等级。
- 2) 控制机构、手柄等的操作，不应损坏。
- 3) 外壳的损坏或变形既不应妨碍设备的继续使用，也不得降低绝缘耐受电压（或电气间隙，或爬电距离）的规定值。
- 4) 表面的损坏，例如掉漆和小的凹陷是允许的。

(3) 防止机械损害的撞击试验装置：试验装置由一个绕其上端在垂直平面内旋转的摆锤构成。摆锤的支点在撞击点上方 1m 处，撞击锤应符合图 6.9-1。

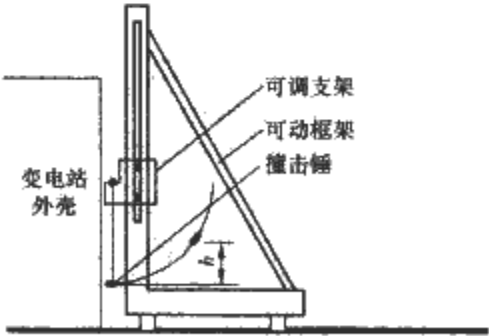


图 6.9-1 撞击试验装置

锤臂的质量和撞击锤总质量之比不大于 0.2，撞击锤的重心应落在锤臂的轴线上。撞击锤端头到撞击点的距离为 60mm±20mm。

为了避免二次撞击，即反弹，在初次撞击后应抓住撞击

锤头使锤头停住；这时要避免锤臂，以防其变形。

在每次撞击前，应目测检查撞击锤的嵌入端，保证其上没有会影响试验结果的损伤。

设备承受的撞击由锤头的质量和下落的高度决定，这一高度是撞击锤升起位置和撞击点之间的垂直距离。

锤头的等效质量为 5kg，下落的高度为 0.4m，产生的撞击能量为 20J。

3.6.3 试验结果判定

1) 外壳的防护等级应保持不变。

2) 控制机构、手柄等的操作不应损坏。

3) 外壳的损伤或变形既不应妨碍设备的继续使用，也不得降低绝缘电压（或电气间隙，或爬电距离）的规定值。

3.7 评估内部故障电弧效应试验

3.7.1 试验设备

设备为 0.5mm 金属线和指示器。

3.7.2 试验方法

(1) 可触及性分为 A、B 两类。

A 类可触及性：有开启的门，并从预装式变电站外部进行操作的那些部分，经批准的人员方能触及。

B 类可触及性：对可触及性不加限制的预装式变电站，包括公共场所使用的，所有的门必须关上，并正确加锁。

(2) 试验的准备：预装式变电站或其代表部分的选择以及电弧的引燃部位应与用户协商确定。在每种情况下，应注意下列几点：

1) 试验应在之前未燃烧过电弧的预装式变电站或其代表部分上进行。

2) 预装式变电站的试验安装条件应尽可能接近在正常使用时的安装条件。

3) 预装式变电站或其代表部分应安全装配好，某些内部元件允许采用与其具有相同体积和相同外层材料的模拟品替代。

4) 如有需要，试验单元应在规定的地点接地。

5) 电弧应在下述部位引燃：①在高压开关设备和控制设备，包括它的电缆隔室的内部引弧，以验证热分解产物的效应，如高压开关设备和控制设备内部的电弧和电缆隔室中的电弧产生的气流相似，只需要在电缆隔室内或开关设备和控制设备内引燃电弧，进行一次试验；②若上一级没有使用对单台变压器的限流保护，或变压器不是用带接地屏蔽的电缆插头连接的，则应在变压器套管外侧引弧。

(3) 外施的电压和电流：预装式变电站应进行三相试验，试验时施加的短路电流应由制造厂规定，它可以等于或低于其高压开关设备和控制设备的额定短时耐受电流。

1) 电压：试验回路外施电压应等于变电站的高压开关设备和控制设备的额定电压。若满足下述条件，可选择较低的电压：①电流实际上保持正弦波形；②电弧不致过早熄灭。

2) 电流：

a. 交流分量：对于变电站电弧试验规定的短路电流，应整定在 $+5\% \sim 0\%$ 的允许范围内，该允差仅对外施电压等于额定电压时的预期电流而言，该电流应保持恒定。（若试验站达不到这一要求，试验应延长直到电流交流分量的积分等于规定值，允差应为 $-10\% \sim 0\%$ ，有些情况下，至少在

前 3 个半波内电流应等于规定值，且在试验终了时应不小于规定值的 50%。）

b. 直流分量：关合瞬间的选择，应使得流过任一边相的峰值电流的预期值是交流分量有效值的 2.5 倍（允差范围为 $+5\% \sim 0\%$ ），并使另一边相也产生电流的大半波，若电压低于额定电压，试验时变电站短路电流峰值应不低于预期峰值的 90%。

3) 频率：当额定频率为 50Hz 或 60Hz 时，试验开始时，频率应在 48~62Hz 之间。在其他频率下，偏离额定值应不超过 $\pm 10\%$ 。

4) 试验的持续时间：电弧持续时间的选择与保护装置确定的电弧的可能的持续时间有关，通常应不超过 1s。对高压开关设备和控制设备具有压力释放装置的变电站进行试验，仅为验证其抗压性能，电弧持续时间 0.1s，通常已经足够。

(4) 试验程序：

1) 电源回路：当预装式变电站用于中性点直接接地的高压电网，电源中性点才能接地。注意不要让连接线改变了试验条件。

通常，在开关设备和控制设备的内部，可以从两个方向给电弧供电，选取的方向应是很可能产生最高应力的方向。

2) 电弧的引燃：电弧应使用直径 0.5mm 的金属线在相间引燃，或在各相导体被分隔时，在一相和地之间引燃。如果带电部分用固体绝缘材料包覆时，电弧应在相邻相之间，或在各相导体被分隔时，在一相和地之间在下列部位引燃：

a. 在绝缘包覆部分的接头或间隙处。

b. 在现场制作（不是用经过型式的预制绝缘件）的绝缘接头处打孔。

引燃点的选择应使电弧的效应在预装式变电站中产生最大的应力。

3) 指示器（用于观察气体的热效应）：指示器是一些黑色的棉布片，其尺寸约为 150mm×150mm，布置时不要让它们的切边朝向试验单元。应当注意不让它们能相互点燃，例如将它们固定在钢板制成的安装框上。

a. A 类可触及性：指示器应在预装式变电站的外部、高压开关设备和控制设备操作的一侧垂直放置。指示器放置高度在 2m 及以下，与试品相距 30cm。面对气体很可能喷出的所有各点（例如：接缝、观察窗和门）。如果预装式变电站超过 2m，在距离地面 2m 处，离预装式变电站 30~80cm 之间还应水平安放指示器。

建议采用黑色的棉纤维制品（单位面积质量约为 150g/m²）作指示器。

b. B 类可触及性：指示器应在预装式变电站所有可触及的侧面附近垂直的放置。指示器放置高度在 2m 以下，与试品相距 10cm 的地方，面对气体可能喷出的所有各点（例如：通风道和门）。在距离地面 2m 处，离预装式变电站 10~80cm 之间还应水平安放指示器。如果预装式变电站低于 2m，指示器应水平安放在其顶部，面对气体可能喷出的所有各点，并靠近其垂直指示器；在此情况下，垂直指示器的安放仅要求达到试验单元的实际高度。

建议采用黑色的棉麻细布（单位面积质量约为 40g/m²）作指示器。

c. 组合试验：若预装式变电站从外部操作的部分已通过了 A 类可触及性试验（例如在门打开时），而且制造厂

能证明，当门关上时，门不受预装式变电站内空气压力上升的影响，可以认为预装式变电站的这一部分通过了 B 类可触及性试验。若在试验中，其余部分按 B 类可触及性进行试验，则可认为整个预装式变电站通过了 B 类可触及性试验。

3.7.3 试验结果判定

- 1) 防护门、面板等是否打开。
- 2) 预装式变电站的能造成损害的部件是否飞出，这包括大的部件或有尖锐边角的部件，例如观察窗、压力释放帘板、盖板。
- 3) 电弧的燃烧以及其他效应是否在预装式变电站外壳的可自由触及的外表面上造成孔洞。
- 4) 垂直放置的指示器是否点燃（不包括因涂料或粘合剂燃烧使指示器点着的情况）。
- 5) 水平放置的指示器是否点燃，通常用高速摄像机拍摄可以作为判定依据。
- 6) 所有的接地连接线是否仍然有效。

3.8 噪声试验

3.8.1 试验设备

试验设备为精密声级计，其测量范围为 20~100dB，分辨率为 0.2dB。

预装式变电站的声发射水平应遵循使用所在地的地方法规的要求。预装式变电站内的变压器在规定的输出容量下连续运行，并按规定的冷却方式进行强制通风时，该项试验的目的是计算一台给定的单独变压器的声级与装在预装式变电站内的同一台变压器的声级的差别。

通过这两个数值的比较来评估预装式变电站外壳的声特性。不希望外壳增高变压器的声级。

3.8.2 试验方法及要求

(1) 变压器的运行条件和测量位置：试验应在变压器处于额定空载运行状态下，分接开关处于额定分接位置。测量位置，试验项目及有效表面积由变压器和冷却器的结构配置情况而定，见表 6.9-4。

表 6.9-4 噪声试验测量位置及试验项目

变压器和冷却器配置情况		不带风冷却器或冷却器单独放置在距离变压器基准辐射面 3m 以上情况应做 1、2 两项试验		风冷却器直接安装在变压器油箱上或单独放置在距离变压器基准发射面小于 3m 的情况应做 3、4 两项试验	
试验项目		1. 变压器声级测量	2. 风冷却器声级测量	3. 风冷却器和潜油泵停止运行时的声级测量	4. 风冷却器和潜油泵投入运行时声级测量
基准发射面确定		从变压器顶部箱盖到底部水平面的垂直投影形成的围绕变压器柱形轮廓面	从冷却器顶部到底部有效部分的垂直投影形成的围绕设备（不包括储油柜、框架油管、阀门）的柱状轮廓面	从变压器顶部箱盖到底部水平面的垂直投影形成的围绕变压器的柱状轮廓面（包括直接固定在变压器油箱上的冷却器、加强铁、电缆盒、分接开关等辅助设备的投影但不包括套管、储油柜、油箱底座、冷却器底座、阀门、控制箱等次要附件）	
轮廓线位置	水平方向	距离基准发射面 0.3m	距离基准发射面 2m	距离基准发射面 0.3m	距离基准发射面 2m
	高 度	油箱高度<2.5m，在 1/2 油箱高度处；油箱高度≥2.5m，两条轮廓线分别在 1/3 和 2/3 油箱高度处	冷却器总高度<4m（不包括储油柜、油管等），在 1/2 高度处；冷却器总高度≥4m，在 1/3 和 2/3 高度处	油箱高度<2.5m，在 1/2 油箱高度处；油箱高度≥2.5m，两条轮廓线分别在 1/3 和 2/3 油箱高度处	
测点位置		测量点应以近似相等的间隔均布布置在轮廓线上，间隔距离不小于 1m，测点数不少于			
		6	10	10	10
声辐射有效表面积计算公式		$S=1.25hP_m$ (m ²)	$S=(h+2)P_m$ (m ²)	$S=1.25hP_m$ (m ²)	$S=(h+2)P_m$ (m ²)
		式中：S—声辐射有效表面积，m ² ；h—变压器油箱高度，m；P _m —轮廓线长度，m 1.25 是考虑到变压器上部发射的声能和冷却器反射等影响而取经验系数；2 是考虑到测量距离可做的修正			

- (2) 运行条件和测量位置：试验时，预装式变电站应放置在周围空间 3m 内没有声音反射的地方，变电站应在空载状态下，通以额定频率的额定电压，在设备外壳正面中心开始，从上看，顺时针方向围绕设备每间隔 1m 处正对面为 1 测量参考点，在每个参考点上测量一次噪声取其平均值为设备的噪声水平。
- 对于预装式变电站测量位置应安放在离地面 1.5m 处。在相同的条件下进行单独变压器和成套设备内变压器噪声试验。
- (3) 噪声测量：在预装式变电站各测量点位置上依次测

- 量 A 加权声级，记录精密声级计的读数 dB 值，传声器应正面对基准辐射面，注意冷却器风流对读数的影响，必要时应加防风罩。
- (4) 背景噪声测量：背景噪声应在设备噪声测量之前和测量之后立即进行，并记录精密声级计读数 dB 值。若背景噪声声级明显低于预装式变电站和背景噪声的合成声级，差值不低于 10dB，则只需在一个测点位置上进行背景噪声的测量，测得的预装式变电站噪声值无需修正；若上述差值小于 10dB，但不低于 3dB，则至少抽取 10 个均匀分布的测量点位置上做背景噪声的测量。若测量点数小于 10 个，则各

点都做背景噪声测量，求出背景噪声平均值后按表 6.9-5 确定背景噪声修正系数。

表 6.9-5 背景噪声修正系数

设备运行时测得的 A 声级与背景噪声 A 声级之差	应减去的修正值
3	3
4	2
5	2
6	1
7	1
8	1
9	0.5
10	0.5
>10	0

若预装式变电站噪声和背景噪声合成声级平均值与背景噪声声级平均值之差小于 3dB，则测试无效。但在预装式变电站噪声和背景噪声的合成声级低于所要求的预装式变电站噪声保证值时，则测试仍然有效。

3.8.3 试验结果判定

预装式变电站的噪声不能高于单独变压器的噪声。

3.9 功能试验

3.9.1 试验设备

试验设备为多功能通电试验装置。

3.9.2 试验方法及要求

应在预装式变电站设备上完成下列检查操作以证明其功能完好：

- 1) 开关设备和控制设备通电操作应符合设计要求，机械特性应符合要求。
- 2) 预装式变电站门及门锁的机械操作应正常，无卡阻现象。
- 3) 绝缘挡板的定位应完好，无松动。
- 4) 变压器温度和液面位置应符合标准要求。
- 5) 电压指示应正常。
- 6) 接地线应正确连接。
- 7) 熔断器应能正常更换，无卡阻现象。
- 8) 如果不同的元器件之间装有联锁装置，其功能应正常。

第 10 章 交流电动机电力电子软起动装置试验

1 简述

本章所述的试验方法、检验规则主要用于额定电压 1140V (1200V) 以下三相交流异步电动机晶闸管调压电力电子软起动装置 (以下简称装置) 的试验。包含了电力电子软起动装置的主要试验及检测。主要依据 JB/T 10251—2001《交流电动机电力电子软起动装置》。覆盖了目前相关标准中的主要试验。

2 型式试验项目

一般检验、外壳防护等级试验、噪声测定、绝缘电阻与介电强度试验、温升试验、轻载试验、电力电子控制器操作性能试验、软起动特性试验、软停车特性试验、限流起动控制特性试验、断相保护试验、过载保护试验、逆序保护试验、散热器过热保护试验、限流起动超时保护试验、起动峰值过电流保护试验、连续运行试验、环境温度性能试验、控制单元高低温循环试验、控制单元的高温存放试验、振动试验。

3 试验方法

装置的外壳防护等级试验、绝缘电阻与介电强度试验的试验方法见第 2 章。

3.1 一般检验

3.1.1 试验设备

游标卡尺 (精度: 0.02mm)、电阻测试仪, 仪器输出电流 AC 或 DC 最少 10A。

3.1.2 试验方法及要求

(1) 开关电器和元件: 软起动电力电子装置及装置内装的开关电器和元件应安装牢固, 选用的额定电压、电流、使用寿命、接通和分断能力、短路耐受强度应符合外形设计要求。开关电器和元件的协调, 特别是软起动电力电子控制器与短路保护器件的协调应符合 GB/T 14048.6 的规定。开关器件和元件按制造厂说明书进行安装。

(2) 印制电路板: 应清晰, 符合相关国家标准要求。

(3) 主电路与辅助电路的鉴别: 用形状、位置、标志或颜色应很容易地区别主电路的保护导体 (PE)。如用颜色, 保护导体 (PE) 必须是绿色和黄色 (双色), 颜色标记最好贯穿导线的整个长度。中性导体 (N) 是淡蓝色。

主电路的鉴别由制造厂负责, 且应与接线图和图样的标志一致。

(4) 指示灯和按钮的颜色: 见第 2 章。

(5) 电气连接、母线与绝缘导线: 母线与绝缘导线的尺寸, 应满足承载电流敷设方法及所承受的机械应力, 应按照国家有关电路的额定绝缘电压确定导线绝缘等级。两个连接器件之间的电线不应有中间接头或焊点。应在固定的端子上进行接线。通常一个端子上只能连接一根导线。将两根或多根导线连接到一个端子上, 只有在端子是为此用途设计或经特殊工艺处理并经试验验证时才允许。

(6) 电气间隙与爬电距离: 装置中各带电电路之间以及带电零部件与导电零部件或接地零部件的爬电距离应符合表 6.10-1 的规定, 电气间隙应符合表 6.10-2 的规定。

表 6.10-1 爬电距离规定值

额定绝缘电压 U_i (V)	爬电距离 (mm)
$U_i \leq 63$	2
$63 < U_i \leq 400$	5.6
$400 < U_i \leq 660$	9
$660 < U_i \leq 800$	11
$800 < U_i \leq 1250$	18

表 6.10-2 电气间隙规定值

额定绝缘电压 U_i (V)	空气中的最小电气间隙 (mm)
$U_i \leq 660$	8
$660 < U_i \leq 1200$	14

(7) 安装与接地: 接地导线需用黄、绿相间的双色线。接地点应有明显的接地标志。测量保护电路的连续性, 可能触及的金属部件与外壳间的接地电阻应小于 0.1Ω 。

(8) 冷却: 装置可采用自然冷却或强迫通风冷却。采用自然冷却时, 散热器周围应当有足够的空间间距。

3.2 噪声测定

3.2.1 试验设备

声级计, 准确度等级 2 级。

3.2.2 试验方法及要求

试验在周围 2m 内没有声音反射面的场所进行。装置处在正常运行状态下, 在正对装置操作面 1m 处测量, 测量时声级计应正对装置噪声源, 沿被试设备表面移动, 按每间隔 1m (不能小于 0.5m) 作为一个参考点。测量采用 A 声级, 测试时尽量避免周围环境噪声对测量结果的干扰。

3.2.3 试验结果判定

装置运行所产生的噪声不大于 80dB 为合格。

3.3 温升试验

3.3.1 试验设备

电流表 (准确度等级 0.5 级)、远红外测温仪 (测量范围应满足试验要求)。

3.3.2 试验方法及要求

(1) 试验条件: 温升试验条件及装置布置见第 2 章。

(2) 试验方法: 装置输入额定工作电压, 输出额定电流, 测试主要部件 (如散热器、IGBT、整流桥、直流母线等) 温升。用远红外测温仪进行温度测量, 试验时间一般不低于 4h, 每间隔 30min 记录试验温升值, 如果温度的变化速率小于 $1K/h$, 则认为温升已达到稳定值。

3.3.3 试验结果判定

装置内部各部件的温升不超过表 6.10-3 规定为合格。

表 6.10-3 装置内部各部件的温升规定值

部件与器件	材料与覆盖层	温升 (K)
半导体电力器件及其他电气元器件	—	应符合元器件各自的标准规定
连接于一般低压电器的 母线连接处的母线	铜: 无被覆层	60
	铜: 搪锡	65
	铜: 镀银	70
	铝: 搪锡	55
连接于半导体器件的 母线连接处的母线	铜: 无被覆层	45
	铜: 搪锡	55
	铜: 镀银	70
	铝: 搪锡	35
与半导体器件相连接 的塑料绝缘导线或橡皮 绝缘导线	—	45

连接到发热器件(如管形电阻,板形电阻等)上的导线应从侧方或下方引出,并需剥去适当长度的绝缘层,换套耐热瓷珠使导线的绝缘端部温度不超过+65℃。

3.4 轻载试验

3.4.1 试验设备

电压表(准确度等级:0.5级)、电流表(准确度等级:0.5级)。

3.4.2 试验方法及要求

输入电压为额定电压条件下,装置输出端接相应容量机组,负载在轻载状态下测量输入电流、输出电流、输出电压及装置和电机工作情况。试验时通过装置的电流应不小于电动机额定电流的5%。

3.4.3 试验结果判定

试验结果应符合装置主回路、元器件、辅助回路各环节和冷却系统等相互协调正常工作为合格。

3.5 电力电子控制器操作性能试验

3.5.1 过载能力试验

(1) 试验设备:电流表(准确度等级0.5级)、电压表(准确度等级0.5级)。

(2) 试验方法及要求:

1) 试验条件:见表6.10-4。

表 6.10-4 过载能力试验条件的最低要求

使用类别	试验电路参数			操作循环②导通时间	操作循环②截止时间(s)	操作循环次数
	I_{LRP}/I_N	U_r/U_N	$\cos\varphi$			
AC-52a AC-52b	4	1.1	0.65	$T_X^{\text{①}}$	≤ 1440	3
AC-53a AC-53b	8		0.35			

注 I_{LRP} —预期转子堵转电流; I_N —额定工作电流; U_N —额定工作电压; U_r —工频恢复电压。

① 预定仅用于与规定的过载电器一起使用的起动器或控制器, T_X 应取其过载电器在热态下所允许承受的最大动作时间,热态是指进行温升试验时达到的热平衡状态。

② 转换时间不应大于工频的3个周期。

2) 试验方法:调整试品使达到试验电流水平 I_{LRP} 的时间最短。当试品带有限流功能时,对应规定的 I_N 将 X 设置为最大值。当试品为起动器时,短接过载继电器。施加试验电压至主电路输入端,将试品切换至导通状态,导通时间之后,再将试品切换至截止状态,重复上述步骤两次,结束试验。

当试品在起动状态而不是在全电压状态带有限流功能时,进行上述两个操作循环后,将试品切换至导通状态,并承载初始试验电流 I_0 ,但不高于 I_N 。使试品处于全导通状态,由外部开关将表6.10-5规定的试验电路接到负载,电流从 I_0 至 I_{LRP} 的转换过程中不应出现中断,在试品建立截止状态之前,试验电流 I_{LRP} 的保持时间为 T_X ,这一操作循环进行两次。对应这4个操作循环的初始壳体温度应不低于+40℃。

表 6.10-5 对感应式电动机负载进行试验时的最低要求及条件

使用类别	试验电动机参数				外部机械负载参数
	K	U/U_N	功率	$\cos\varphi$	
AC-52a,b	≥ 4	1.0	同 $\cos\varphi$	任意功率值的4极感应电动机,电动机的无载电流应大于试品的最小负载电流, $\cos\varphi$ 为0.75~0.80,定子绕组为星形接法	连接在电动机转轴上的机械负载参数应加以调整,以使从基准转速降至零转速的减速时间在2~4s范围内
AC-53a,b					
AC-58a,b					

注 K—试验电动机的转子堵转电流对额定满载电流的比值。

(3) 试验结果判定:电力电子控制器不丧失转换能力,不丧失关断能力,不丧失功能,无可见的损坏现象为合格。

3.5.2 关断和变换能力试验

(1) 试验设备:电流表(准确度等级0.5级)、电压表(准确度等级0.5级)。

(2) 试验方法及要求:对试品施加电压 U_N 和 U_s ,控制电压 U_c 断开,测量试品每一极上的电压 U 并记录为 U_0 ,由控制电压 U_c 实现导通和截止状态的循环操作(导通时间)达到全电压和全转速的时间+1s;截止时间=惯性转动至静止时间的1/3,如果不按照规定工作或出现损坏现象,终止试验,认为试验不合格。进行规定次数(85% U_N 和85% U_s 下操作100次,110% U_N 和110% U_s 下操作1000次)的操作循环之后,接通 U_N 断开 U_c ,重复电压测量,记录对应初始值 U_0 的终值 U_F ,计算每一极上电压变化值, $\Delta U = (U_F - U_0)/U_0$ 。

(3) 试验结果判定:对装置每一极 $\pm \Delta U < 0.10$,无可见的损坏现象,制造厂规定的功能无丧失为合格。

3.6 软起动特性试验

3.6.1 试验设备

电压表(准确度等级0.5级)、电流表(准确度等级0.5级)、高性能记录仪。

3.6.2 试验方法及要求

输入电压为额定电压的条件下,装置输出接相应容量机组。轻载状态下起动,相邻两次起动时间间隔由生产厂提供,记录起动电压的波形图,测量软起动基值电压 U_p 、突跳起动电压 U_k 、斜坡上升时间 t_r 、突跳时间 t_k 。

3.6.3 试验结果判定

(1) 装置应具备电压(U_k)和时间(t_k)可调的突跳起

动功能，有助于克服大静摩擦负载。

(2) 装置的起动基值电压 U_p 可根据需要调节，推荐范围为 25%~75% 的额定电压。

(3) 起动斜坡上升时间 (t_r) 可根据需要调节，范围应不小于 1~60s 为合格。

3.7 软停车特性试验

3.7.1 试验设备

电压表 (准确度等级 0.5 级)、电流表 (准确度等级 0.5 级)、高性能记录仪。

3.7.2 试验方法及要求

输入电压为额定电压的条件下，装置输出接相应容量机组。在轻载状态下软停车，记录软停车电压的波形图，测量软停车基值电压 U_t 、断开电压 U_z 、斜坡下降时间 t_{r2} 。

3.7.3 试验结果判定

装置可设置可调的软停车基值电压 (U_t) 和断开电压 (U_z)；软停车斜坡下降时间 t_{r2} 可根据需要调节，范围应等于或大于 1~60s 为合格。

3.8 限流起动控制特性试验

3.8.1 试验设备

电流表 (准确度等级 0.5 级)、高性能记录仪。

3.8.2 试验方法及要求

输入电压为额定电压的条件下，装置输出接相应容量机组。轻载状态下限流起动，记录起动电流的波形图，测量软起动限流值 I_d 。

3.8.3 试验结果判定

限流值 I_d 可连续调节，范围应等于或大于 1.0~4.0 倍额定电流为合格。

3.9 断相保护试验

人为将电源侧或电动机侧三相中任一相断相，装置能有效保护晶闸管，发出相应的报警指示信号。

3.10 过载保护试验

3.10.1 试验设备

电流表 (准确度等级 0.5 级)、高性能记录仪。

3.10.2 试验方法及要求

增加装置输出负载电流至过载保护值，通常在产品标准中规定装置应在规定时间内保护，用记录仪记录输出电流波形，测量过载电流值和过载动作时间。

3.10.3 试验结果判定

装置应具有过载保护，过载电流可在表 6.10-6 所列过载电器脱扣等级范围内设定，过载动作的时间应可以调节。

表 6.10-6 相应过载电器脱扣等级和过电流倍数 X 的最小过电流耐受时间 T_X

脱扣等级	最小过电流耐受时间 T_X (s)						
	X=8	X=7	X=6	X=5	X=4	X=3	X=2
10	1.6	2	3	4	6	12	26
10 ^①	3	4	6	8	13	23	52
20 ^①	5	6	9	12	19	35	78
30 ^①	7	9	13	19	29	52	112

① 本规定仅为推荐性，且表示脱扣等级的最小脱扣时间与相应的 X 和 T_X 值相匹配，并应在产品标准中规定。

3.11 逆序保护试验

装置只有当电源相序正确时，才能工作。当电源相序接错导致电机反向时，不能运行。此时逆序保护应动作并发出相应的报警信号为合格。

3.12 散热器过热保护

3.12.1 试验设备

高温试验箱 (使用范围应能满足试验要求)。

3.12.2 试验方法及要求

将热保护器取下放入高温箱中加热到保护值 ($80^{\circ}\text{C} + 5^{\circ}\text{C}$)，观察热保护器触点动作，记录温度值。

3.12.3 试验结果判定

在过热到 $80^{\circ}\text{C} + 5^{\circ}\text{C}$ 时，封锁晶闸管脉冲，并发出故障指示为合格。

3.13 限流起动超时保护

3.13.1 试验设备

电流表 (准确度等级 0.5 级)、高性能记录仪。

3.13.2 试验方法及要求

输入电压为额定电压的条件下，装置输出接相应容量机组。轻载状态下限流起动，当限流起动持续时间过长，超过设定时间值时，停车并发出故障报警信号。此时记录起动电流的波形图，测量限流起动时间。

3.13.3 试验结果判定

当限流起动持续时间过长，超过设定时间值时，停车并发出故障报警信号为合格。

3.14 起动峰值过电流保护

3.14.1 试验设备

电流表 (准确度等级 0.5 级)、高性能记录仪。

3.14.2 试验方法及要求

在起动时当电流超过设定值时，装置应有效保护晶闸管，同时发出故障报警指示信号。用记录仪记录起动电流波形，测量过电流值。

3.14.3 试验结果判定

在起动时当电流超过设定值时，装置应有效保护晶闸管，同时发出故障报警指示信号为合格。

3.15 连续运行试验

3.15.1 试验方法及要求

装置在规定的电源条件下，将其输入、输出端连接到外部模拟装置，或带实际负载，不间断地连续运行。在最高环境温度 $+40^{\circ}\text{C}$ 下至少连续运行 24h。

3.15.2 试验结果判定

在整个过程中，其各种动作、功能及程序均正确无误为合格。

3.16 环境温度性能试验

3.16.1 试验设备

高低温试验箱 (使用范围应满足试验要求)。

3.16.2 试验方法及要求

装置分别置于规定的最高温度 $+40^{\circ}\text{C}$ 和最低温度 -5°C 下，保持规定的存放时间 4h 后，将被试产品加上额定负载并待产品内部器件的温升达到稳定值时，测量产品电气性能。

3.16.3 试验结果判定

试验后，产品电气性能符合规定为合格。

3.17 控制单元高低温循环试验

3.17.1 试验设备

高低温冲击试验箱（使用范围应满足试验要求）。

3.17.2 试验方法及要求

将装置中控制单元置于温度为-40℃的低温箱中存放到规定时间 30min，然后取出置于试验室的环境温度（+10~+40℃）下保存时间 2~3min，再放入到温度为+60℃的高温箱中存放规定时间 30min，再取出置于试验室温度下保持时间 2~3min，即为一循环。循环次数为 5 次。

3.17.3 试验结果判定

试验后，待被试品恢复到试验室环境温度，再进行外观检查及电气性能测试，符合规定要求为合格。

3.18 控制单元的高温存放试验

3.18.1 试验设备

高温试验箱（使用范围应满足试验要求）。

3.18.2 试验方法及要求

控制单元置于温度为+70℃的高温箱中连续存放到规定时间 72h，然后取出置于试验室内环境温度下恢复。待被试品恢复到试验室环境温度，进行外观检查及电气性能

测试。

3.18.3 试验结果判定

试验后，装置的外观检查及电气性能测试符合规定要求为合格。

3.19 振动试验

3.19.1 试验设备

振动试验台（使用范围应满足试验要求）。

3.19.2 试验方法及要求

振动试验要求按表 6.10-7 的规定。振动试验应分别在 3 个互相垂直的轴向进行。

表 6.10-7 振动试验要求

频率范围	振幅和加速度	振动持续时间	设备状态
$10\text{Hz}\leq f\leq 57\text{Hz}$	0.075mm, 10m/s ²	10 个扫描周期/每轴 (在相互垂直的每个轴上)	不带电
$57\text{Hz}\leq f\leq 150\text{Hz}$			

试验检查可进行直观检查和通电试验。

3.19.3 试验结果判定

试验后对被试装置做机械和电气方面的功能检查：装置的外壳结构及柜体各部分无机械破坏性损伤或变形，电气系统无电接触不良现象，无焊点脱落和虚焊现象；无接插件松动、脱离导轨或偏离固定位置的现象为合格。

第 11 章 低压直流成套开关设备和控制设备试验

1 简述

本章阐述了低压直流成套开关设备和控制设备（以下简称直流设备）包括直流操作供电设备、各种场合经常负荷直流电源设备、应急供电设备和备用直流供电设备的试验方法及检测技术，包含了目前低压直流成套开关设备和控制设备的试验及检测。主要依据 JB/T 8456—2005《低压直流成套开关设备和控制设备》，覆盖了目前低压直流成套开关设备和控制设备相关标准所规定的主要试验。

2 型式试验项目

一般检查、介电性能试验、电气间隙和爬电距离测量、绝缘电阻测量、温升试验噪声试验、防护等级试验、功能试验、性能试验（基本性能试验、稳压精度试验、稳流精度试验、纹波因数试验、效率试验、功率因数试验、谐波含量试验）、机械操作试验、并机均流不平衡度试验、事故放电能力试验、连续供电能力试验、接地连续性试验、电磁兼容性（EMC）试验、短路耐受强度试验、过载能力试验、环境性能试验。

3 试验方法

装置的介电性能试验、电气间隙和爬电距离测量、绝缘电阻测量、防护等级试验、机械操作试验、接地连续性试验、短路耐受强度试验的试验方法见第 2 章。

3.1 一般检查

3.1.1 铭牌

直流设备应配备一个或多个铭牌，铭牌应坚固、耐久，其位置应该是在设备安装好后易于看到的地方，字迹要清楚。

a~c 的内容应在铭牌中给出，d~o 的内容可以在铭牌上给出，也可以在制造厂的技术文件中给出。

a 制造厂名称或商标；b 产品型号及名称；c 产品制造日期；d 其他数据，如直流设备的设计、制造所执行标准；e 蓄电池组容量；f 额定工作电压；g 额定绝缘电压；h 辅助电路的额定电流；i 每条电路的额定电流；j 防护等级；k 对人身的防护措施；l 使用条件或特殊使用条件；m 外形尺寸；n 重量；o 功能单元的电气连接形式。

3.1.2 标志

在直流设备内部应能辨别出单独的电路及其保护器件。应标明电气元件的项目，所用的标记应与随同直流设备提供的接线图上的标记一致。

3.1.3 安装、操作和使用说明书

制造厂的技术文件应当规定直流设备及设备内电气元件的安装、操作和使用维护条件。

应提供电气原理图、接线图、安装、操作和使用说明书。

3.1.4 按钮指示灯颜色

直流设备应对按钮、指示灯颜色作出规定，以保证人身

安全。

(1) 按钮颜色应符合表 6.11-1。

(2) 指示灯颜色应符合表 6.11-2。

表 6.11-1 按钮颜色及其含义

颜色	含 义	说 明	举 例
红	紧急情况	在危险和在紧急状态时操作	紧急分断，引起紧急分断动作，可用于停止/分断
黄	不正常	在出现不正常状态时操作	干预，为了遏制不正常状态干预，为了使中断的自动化过程重新启动
绿	安全	在安全条件下操作或在正常状态时操作	起动/接通

表 6.11-2 指示灯颜色及其含义

颜色	含 义	说 明	举 例
红	合闸/告急	合闸供电或需立即采取行动	输出过电压，电池组充电过电流
黄	注意	情况有变化，或将发生变化	闪光信号
绿	安全	正常或允许运行	系统正常支路输出指示

3.1.5 导线

(1) 导线的基本要求：主电路的绝缘导线应为阻燃绝缘铜母线，控制电路应采用多股绝缘铜导线。

(2) 直流设备母线排列应符合第 2 章表 6.2-22。

(3) 母线截面积应不小于表 6.11-3 的规定。

表 6.11-3 直流馈出线母线截面积

额定电流 (A)	铜母线截面积 (mm ²)	
	最小	最大
≤80	16	25
80	25	35
100	35	50
125	50	70
160	70	95
200	95	120
250	120	150
315	150	200
400	200	250

3.2 温升试验

3.2.1 试验设备

远红外测温仪，测量范围 0~+100℃，精度±1℃；可调负载电阻。

3.2.2 试验方法及要求

直流设备应如同正常使用时一样放置，所有覆板等都应

齐全就位。

试验环境条件温度在 10~40℃ 范围内，周围至少用 4 支热电偶或温度计布置在直流设备周围，高度为直流设备的 1/2，距离直流设备为 1m，并应防止空气流动和热辐射对温度计和热电偶的影响，在全部试验时间后的 1/4 试验期间时，每间隔 1h 测量直流设备各点温升（一般不超过 8h），当所测得各点温升变化不超过 1K/h 时，则认为温升稳定。

3.2.3 试验结果判定

试验结束时，温升不超过表 6.11-4 的规定值，且直流设备在其规定的电压范围内应能正常良好的工作为合格。

表 6.11-4 温 升 限 值

直流设备部件	温升 (K)
变压器和电抗器绕组（包括与其相接触的绕组骨架和铁心）按其绝缘材料耐热等级分为	
A 级	65
E 级	80
B 级	85
晶闸管和整流器外壳	65
硅堆外壳	70
电阻元件	200 ^①
导线与端头压接部位	30
用于连接外部绝缘导线用端子	70 ^②
母线上插接式触点处与母线固定连接处	
铜-铜	50
铜镀锡-铜镀锡	60
铝镀锡-铝镀锡	55
铜镀银-铜镀银	80
铝镀银-铝镀银	55
操作手柄：	15 ^③
金属的	25 ^③
绝缘材料的可接近的外壳和覆板	
金属表面	30 ^④
绝缘表面	40 ^④

- ① 电器应具有防止与易燃材料接触或人的偶然接触。确定安装位置
和提供防护措施以免发生危险是安装者的责任。
- ② 温升极限为 70K 是按常规试验而定的数值。在安装条件下使用或
试验的直流设备，由于接线、端子类型、种类、布置与试验（常
规）所用的不尽相同，因此端子的温升会不同，这是允许的。
- ③ 那些只有在直流设备打开后才能接触到的操作手柄，由于不经常
操作，故允许有较高的温升。
- ④ 除非另有规定，对于正常工作时可接近，但不需接触的外壳和覆
板表面，温升可提高，金属表面可提高 25K，绝缘表面可提高
15K。

3.3 噪声试验

3.3.1 试验设备

精密声级计；测量范围 24~130dB，分辨率 0.1dB。

3.3.2 试验方法及要求

试验应在直流设备布置周围 2m 内没有声音反射面的环境下进行。精密声级计应布置在与直流设备正面操作面 1m 处，正对直流设备噪声源。试验时精密声级计沿被试直流设备表面移动，每间隔 1m 处（不能小于 0.5m）作为一个参考点。试验时精密声级计应采用 A 声级，并尽量避免周围环境噪声对测量结果的干扰。

3.3.3 背景噪声修正

当每个测点上测量 A 声级时，若与背景噪声的 A 声级之差小于 10dB 时，则应按表 6.11-5 所列修正值对所测得的

A 声级加以修正。

表 6.11-5 背景噪声修正系数

直流设备工作时测得的 A 声级与 背景噪声 A 声级之差	应减去的修正值
3	3
4	2
5	2
6	1
7	1
8	1
9	0.5
10	0.5
>10	0

3.3.4 试验结果判定

对于风冷直流设备的平均噪声（A 声级）应不大于 60dB，自冷直流设备的平均噪声（A 声级）应不大于 55dB。

3.4 功能试验

直流设备应具有控制、测量、保护、故障报警等通信功能。在操作盘面上应能观察到相应的报警指示。

- (1) 按直流设备的技术条件设定直流设备的保护及报警值。
- (2) 人为改变直流设备相关参数，以模拟保护及报警各种状况。

3.5 性能试验

试验设备：高性能示波器，容量 40MHz；高性能波形记录仪，电源 DC—200kHz；交流电压表，测量范围 7.5~600V、0.5 级；直流电压表 0.5 级；数字电压表，测量范围 20mV~1000V；功率计；负载电阻，20A、20Ω。

3.5.1 基本性能试验

直流设备在模拟阻性负载运行状态下，使交流输入电压为额定值，输出电压为浮充电压规定值，常规负荷母线电流为额定值。

切除监控系统电源，直流设备应能维持正常的蓄电池浮充电工作及常规负荷母线的电压和电流。

3.5.2 稳压精度试验

(1) 试验条件。直流设备在模拟阻性负载运行状态下，试验前调整直流设备的输出电压值至规定的浮充电压值 U_N ，常规负荷母线的输出电流为直流输出额定电流。试验电路见图 6.11-1。

(2) 试验方法及要求：

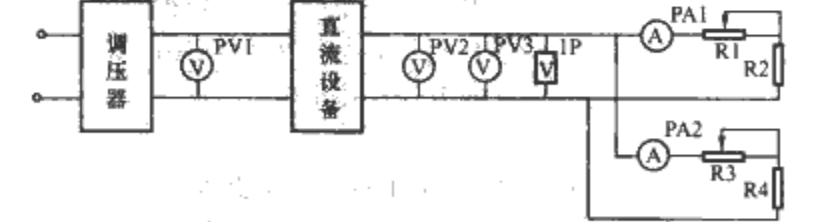


图 6.11-1 稳压精度、稳流精度、晶闸管充电
装置纹波因数试验电路图
PV1—0.5 级交流电压表（测交流输入电压）；PV2—0.5
级直流电压表（测直流输出电压），PV3—真空管毫伏表
（测直流输出电压的交流分量有效值）；1P—示波器（测直
流输出电压的交流分量峰值、谷值）；PA1—0.5 级直流电
流表（测充电电流）；PA2—0.5 级直流电流表（测常规负
荷母线电流）；R1、R3—滑线变阻器；R2—蓄电池组模拟
负载；R4—常规负荷模拟负载

1) 将交流输入电压调至 115% 的额定值, 负载电流调至 0% 额定值, 测得直流设备的输出电压值 U_{DC1} 及交流分量有效值 (对于高频开关整流器则为交流分量峰值与谷值之差) U_{AC1} 。

2) 将交流输入电压调至 100% 的额定值, 负载电流调至 50% 额定值, 测得直流设备的输出电压值 U_{DC2} 及交流分量有效值 (对于高频开关整流器则为交流分量峰值与谷值之差) U_{AC2} 。

3) 将交流输入电压调至 90% 的额定值, 负载电流调至 100% 额定值, 测得直流设备的输出电压值 U_{DC3} 及交流分量有效值 (对于高频开关整流器则为交流分量峰值与谷值之差) U_{AC3} 。

4) 将测得的电压值代入稳压精度 δ_u 计算公式

$$\delta_u = (U_i - U_e) / U_e \times 100\%$$

式中: δ_u 为第 i 次稳压精度计算值, i 为测量次数; U_i 为第 i 次输出电压值; U_e 为输出电压规定值。重复上述试验 3 次, 计算出稳压精度值, 并以其中最大值作为直流设备的稳压精度。

(3) 试验结果判定: 计算结果稳压精度应不大于 $\pm 1\%$ (采用晶闸管) 或 $\pm 0.5\%$ (采用高频开关) 为合格。

3.5.3 稳流精度试验

(1) 试验条件: 试验应在直流设备处于恒流充电状态或恒流放电状态下进行。直流设备在模拟阻性负载运行状态下, 测量其输出负载电流在额定状态下调整为规定恒流值。充电装置带有两部分负载时, 常规负荷母线电流不作为稳流精度试验用恒定电流。试验电路图见图 6.11-1。

(2) 试验方法及要求:

1) 将输入电压调至 115% 的额定值并调节负载使输出电压为 90% 的额定值, 常规负荷母线电流调至 0% 额定值, 测得直流设备的稳流回路输出电流 I_1 。

2) 将输入电压调至 100% 的额定值并调节负载使输出电压为 100% 的额定值, 常规负荷母线电流调至 50% 额定值, 测得直流设备的稳流回路输出电流 I_2 。

3) 将输入电压调至 90% 的额定值并调节负载使输出电压为浮充电压规定值, 常规负荷母线电流调至 100% 额定值, 测得直流设备的稳流回路输出电流 I_3 。

4) 将测得的充电电流值代入稳流精度 δ_i 计算公式

$$\delta_i = (I_i - I_e) / I_e \times 100\%$$

式中: δ_i 为第 i 次稳流精度计算值, i 为测量次数; I_i 为第 i 次充电电流值; I_e 为恒流充电电流规定值。

重复上述试验 3 次, 计算出稳流精度值, 并以其中最大值作为直流设备的稳流精度。

(3) 试验结果判定: 稳流精度应不大于 $\pm 1\%$ (采用晶闸管) 或 $\pm 0.5\%$ (采用高频开关) 认为试验通过。

3.5.4 纹波因数试验

(1) 试验条件: 试验应在直流设备处于恒流充电状态或恒流放电状态下进行。直流设备在模拟阻性负载运行状态下, 测量其输出负载电流在额定状态下调整为规定恒流值。充电装置带有两部分负载时, 常规负荷母线电流不作为稳流精度试验用恒定电流。试验电路图见图 6.11-1。

(2) 试验方法及要求: 将 3.5.2 中测得的电压值分别代入纹波因数计算公式

$$\Gamma_u = U_{ACi} / U_{DCi} \times 100\%$$

式中: Γ_u 为第 i 次纹波因数计算值, i 为测量次数; U_{ACi} 若整流器采用晶闸管则为第 i 次直流输出电压的交流分量有效值, 若整流器采用高频开关则为第 i 次直流输出电压的交流

分量峰值与谷值之差; U_{DCi} 第 i 次直流输出电压值。

重复上述试验 3 次, 计算出电压纹波因数, 以其中最大值作为晶闸管整流器的有效值电压纹波因数或是高频开关充电装置的峰值电压纹波因数。

(3) 试验结果判定: 纹波因数应不大于 1% (采用晶闸管) 或 0.5% (采用高频开关) 为合格。

3.5.5 效率测定

(1) 试验方法及要求:

1) 直流设备在模拟阻性负载运行状态下, 交流输入电压为额定值, 输出电压为浮充电压规定值, 常规负荷母线电流为额定值, 分别测量交流侧输入功率与直流侧的电压、电流值。

2) 将测量值代入计算公式计算效率 η

$$\eta = U_o I_o / P \times 100\%$$

式中: η 为直流设备效率; U_o 为直流设备直流输出电压; I_o 为直流设备直流输出电流; P 为直流设备交流输入功率。

(2) 试验结果判定: 计算结果 η 应不小于 75% (采用晶闸管) 或 90% (采用高频开关) 认为试验通过。

3.5.6 功率因数测定

(1) 试验方法及要求: 直流设备在模拟阻性负载运行状态下, 使交流输入电压为额定值, 输出电压为均衡充电电压规定值, 常规负荷母线电流为额定值。

(2) 试验结果判定: 测量结果 $\cos\varphi$ 应不小于 0.7 (采用晶闸管)、0.95 (采用有源功率因数校正电路的高频开关)、0.90 (采用无源功率因数校正电路的高频开关) 为合格。

3.5.7 谐波含量试验

(1) 试验条件: 直流设备在模拟阻性负载运行状态下, 交流输入电压为额定值, 输出电压为均衡充电电压规定值, 常规负荷母线电流为额定值。

(2) 试验方法及要求: 测量谐波次数为 2~19 次。测量次数不少于 5 次, 每次谐波值取 5 个接近的实测值的算术平均值, 并计算第 2~19 次的谐波电流方均根值及电流总谐波畸变率。

(3) 试验结果判定: 直流设备在正常运行状态下, 返回交流侧的电流总谐波畸变率不大于 30% 为合格。

3.6 并机均流不平衡度试验

3.6.1 试验设备

0.5 级直流电压表、0.5 级直流电流表、负载电阻。

3.6.2 试验条件

直流设备在模拟阻性负载运行状态下, 交流输入电压为额定值, 输出电压为浮充电压规定值, 常规负荷母线电流为额定值。

3.6.3 试验方法及要求

(1) 调整模拟负载, 使常规负荷母线电流为额定值的 50%, 测量各个单体模块的输出电流及高频开关的总输出电流。

(2) 将测量值分别代入均流不平衡度计算公式

$$\beta = |I_i - I_o/n| / (I_o/n) \times 100\%$$

式中: β 为均流不平衡度; I_i 为单体模块输出电流; i 表示第 i 块并机模块; I_o 为总输出电流; n 为并机模块数。

(3) 调整模拟负载, 使常规负荷母线电流为额定值的 75%, 测量各个单体模块的输出电流及高频开关的总输出电流。将测量值分别代入均流不平衡度计算公式。

(4) 调整模拟负载, 使常规负荷母线电流为额定值的 100%, 测量各个单体模块的输出电流及高频开关的总输出

电流。将测量值分别代入均流不平衡度计算公式。

取3次均流不平衡度的算术平均值,作为直流设备的并机均流不平衡度。

3.6.4 试验结果判定

计算结果 β 应不大于 $\pm 5\%$ (高频开关整流器并机工作时)为合格。

3.7 事故放电能力试验

3.7.1 试验设备

0.5级直流电压表;0.5级直流电流表;高性能波形记录仪;200kHz。

3.7.2 试验方法及要求

直流设备在切除交流输入电源情况下,按母线额定输出电流放电1h后,负荷母线输出额定电流不变,另输出10次动力负荷母线标称的电流,每次输出时间为500ms,间歇2s,记录动力负荷母线电流、电压曲线。试验电路见图6.11-2。

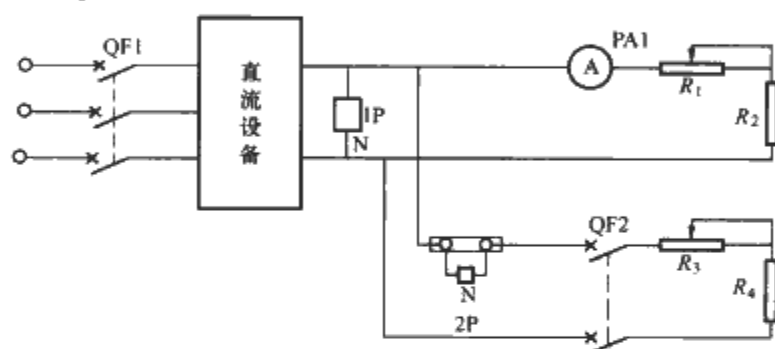


图 6.11-2 事故放电能力验证试验电路

QF1、QF2—直流断路器;1P—记录仪电压输入端(记录直流电压);2P—记录仪电流输入端(记录冲击放电的电流曲线);PA1—0.5级直流电流表(测充电电流); R_1 、 R_3 —滑线变阻器; R_2 —蓄电池组模拟负载; R_4 —常规负荷模拟负载

3.7.3 试验结果判定

交流电源断电,常规负荷母线以额定电流输出1h后,叠加动力负荷母线电流,进行10次冲击放电,动力负荷母线电压在冲击放电时不低于标称电压的90%认为试验通过。

3.8 连续供电能力试验

3.8.1 试验设备

0.5级直流电压表;0.5级直流电流表;高性能波形记录仪;200kHz。

3.8.2 试验条件

直流设备在正常工作情况下,使常规负荷母线输出额定电流,充电装置处于浮充电状态。

3.8.3 试验方法及要求

人为中断直流设备的交流输入电源,至少20ms后再次恢复交流输入电源,记录全过程的常规负荷母线电压波形。

3.8.4 试验结果判定

直流设备在正常运行时,迅速切断交流电源,常规负荷母线电压不应间断,且电压波动不低于标称电压的90%为合格。

3.9 电磁兼容性(EMC)试验

3.9.1 试验设备

雷击浪涌发生器:0~10kV,电压1.2/50 μ s,电流8/20 μ s。静电放电测试仪:试验电压8kV空气放电,放电电流持续时间30ns,放电电流上升时间5ns,放电电压正、负极性;脉冲群模拟干扰器:试验电压2kV,单个脉冲持续时

间50ns,单个脉冲上升时间5ns,脉冲群持续时间15ms,脉冲极性正、负。

3.9.2 试验方法及要求

(1) 抗扰性试验:

1) 1.2/50 μ s、8/20 μ s浪涌抗扰度试验:将规定参数的浪涌经过电容耦合网络按线—线或线—地方式加入到直流设备的交流电源的输入端。浪涌波在交流电压波的零值和峰值的电压相位处同步加入。在直流设备的选定点上分别施加正极性和负极性的浪涌波各5次,重复率为1次/min。浪涌1.25/50 μ s~8/20 μ s,试验水平为线对地2kV,线对线1kV。

2) 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验:将规定参数的脉冲群以共模方式叠加在直流设备的交流电源输入端、通信输入/输出端和通信端口上。施加时间不少于1min。严酷等级为3级(典型工业环境)。

对交流电源输入端试验电压2kV,对通信输入/输出端和通信端口试验电压1kV;单个脉冲持续时间50ns,单个脉冲上升时间5ns,脉冲群持续时间15ms,脉冲极性为正、负极性。

3) 射频电磁场辐射抗扰度试验:

a. 试验条件:直流设备应运行于额定交流输入,额定常规负荷电流,充电装置为均衡充电状态下。

b. 试验方法:将直流设备置于屏蔽室中进行,直流设备置于高出地面0.1m的非导电支撑物上,非导电支撑物为非导体,同时将双锥形天线放置在距直流设备1m处。信号发生器通过天线发射连续波,用1kHz的正弦波对信号进行80%的幅度调制后,在80~1000MHz频率范围内进行扫描测量。扫描速度不应超过 1.5×10^{-3} 十倍频程/s,直流设备所受场强为10V/m。试验在发射天线对准直流设备的4个面的每一个侧面进行。对直流设备的每一侧面有在发射天线的两种极化状态下进行试验,一次在天线垂直极化位置,一次在天线水平极化位置。

4) 静电放电抗扰度试验:主要试验点为与地绝缘的金属外壳、控制面板和人机界面上的点、指示器件(表和指示灯等)、缝隙等。

试验方法:将静电放电发生器的放电电极垂直地接近直流设备,直至放电发生,然后移开放电电极,再进行下一次放电。试验以单次放电的方式进行,在试验点上施加10次单次放电,连续单次放电之间的时间间隔建议至少1s。

试验电压:8kV空气放电,放电电流持续时间30ns,放电电流上升时间5ns,放电电压极性为正、负极性。

5) 试验结果判定。试验结果应按直流设备的工作情况和技术条件进行如下分类:

- 在技术条件内性能正常。
- 功能或性能暂时降低或丧失,但能自动恢复。
- 功能或性能暂时降低或丧失,但需操作者干预或系统复位。

d. 因设备(元件)或软件损坏或数据丢失而造成不能自行恢复的功能降低或丧失。

试验结束后,直流设备出现上述分类中a、b两种现象,则认为试验合格。如出现包括c、d两种现象在内的其他现象,均认为试验不合格。

(2) 发射试验:

1) 试验方法及要求:直流设备电源端传导的骚扰电压限值见表6.11-6,直流设备电源端辐射骚扰限值见表6.11-7。

表 6.11-6 直流设备电源端传导的骚扰电压极限值

频带 (MHz)	准峰值 (dB, μ V)	平均值 (dB, μ V)
$0.15 \leq f < 0.5$	79	66
$0.5 \leq f \leq 5.0$	73	60
$0.5 < f < 30.0$	73	60

表 6.11-7 直流设备电源端辐射骚扰极限值

频带 (MHz)	在试验场	在使用现场
	测量距离 30mm (dB, μ V/m)	测量距离 30mm (指设备所在建筑 物外, 离外墙距离) (dB, μ V/m)
0.5~30	考虑中	考虑中
30~230	30	30
230~1000	37	37

2) 试验结果判定: 发射试验满足表 6.11-6 和表 6.11-7 要求为合格。

3.10 过载能力试验

3.10.1 试验设备

0.5 级直流电压表; 0.5 级直流电流表; 负载电阻。

3.10.2 试验方法及要求

直流设备在模拟阻性负载运行状态下, 输入交流电压为额定值, 输出电压为浮充电压规定值, 常规负荷母线电流为额定值的 110%。

3.10.3 试验结果判定

在额定功率的 110% 情况下, 直流设备至少可正常运行 10min, 为合格。

3.11 环境性能试验

3.11.1 试验设备

高、低温试验箱: 容量应满足试验范围; 高、低温冲击箱 (-40~+100)℃。振动试验装置: 3 个互相垂直的轴

向, 频率范围 5~100Hz, 振幅 2mm

3.11.2 试验方法及要求

(1) 低温性能试验: 将试验样品放置温度为 -5℃ 的低温试验箱内, 试验期间试验样品为正常通电状态, 试验持续时间 4h。试验结束前测量装置的电气性能, 应能满足正常工作要求。

(2) 高温性能试验: 将试验样品放置温度为 +40℃ 的高温试验箱内, 试验期间试验样品为正常通电状态, 从试验样品达到稳定温度开始计算, 试验持续时间 4h。试验结束前测量装置的电气性能, 应能满足正常工作要求。

(3) 高温存放试验: 将试验样品放置温度为 +70℃ 的高温试验箱内, 从试验样品达到稳定温度开始计算, 试验持续时间 24h。试验结束后取出试验样品 1h 后, 测量装置的电气性能, 应能满足正常工作要求。

(4) 温度变化试验: 在试验开始前, 试验样品的温度为室温, 样品应在不包装、不通电、准备使用状态下, 将低温箱预先调节到低温 -40℃, 然后将样品放置箱内达到稳定温度, 保持时间 30min; 再将试验样品转换到预置好的高温箱 +60℃ 达到稳定温度, 保持时间 30min。

以上交变循环 5 次; 每次转换及室温停顿时间为 3min。试验结束取出试品 1h 后, 测量装置的电气性能, 应能满足正常工作及技术指标要求。

(5) 振动试验: 振动试验是考核直流设备经受振动的适应性和结构的完好性。试验前直流设备的电气性能和机械性能应能满足正常工作及技术指标要求。

按规定将直流设备固定在振动试验台上, 试验时直流设备应处于准备工作状态。直流设备应在 3 个互相垂直的轴向依次重复经受下列振动:

- 频率: 25Hz。
- 振动幅值: 1mm。
- 振动周期: 10min 或 30min。

振动试验后测量直流设备的电气性能和机械性能, 应能满足正常工作及技术指标要求。

第12章 自耦减压起动控制装置试验

1 简述

本章所述的试验方法、检测技术主要是用于自耦减压起动控制装置的试验,包括使用类别为AC-3(用于笼型感应电动机的起动和在运转中的分断)自耦减压起动控制装置;频率50Hz(或60Hz),额定电压交流1000V(1140V)及以下的自耦减压起动控制装置,包含了目前自耦减压起动控制装置的主要试验和检测。主要依据JB/T 8752—1998《自耦减压起动控制装置》,包括了自耦减压起动控制装置规定的主要试验内容。

2 特性

2.1 额定起动电压

从起动用的自耦变压器的抽头上取出的已降低的电压。额定起动电压的优选值:一般为额定工作电压的80%和65%,或80%和50%。

2.2 额定工作功率 P_N

指被控电动机的额定功率 P_N 由所控制起动的电动机确定。

2.3 额定工作制

任何工作制的起动控制装置,应能够从冷态开始,接连地起动两次(两次之间的时间间隔为30s)。额定工作制分为:①8小时工作制;②不间断工作制;③断续周期工作制。

负载因数(即通电持续率)的标准值为15%,25%,40%和60%。

依操作循环次数,断续周期工作制可分为:①3级,每小时操作3次;②12级,每小时操作12次;③30级,每小时操作30次。

期间,一个操作循环是指:从起动位置到运转位置,于电动机到达全速运行后,再投到停止位置,使电动机停止运行。

2.4 短时工作制

短时工作制是电器主触头保持闭合的时间不足以使电器达到热平衡,有载时间之间被空载时间隔开,而空载时间足以使电器温度恢复到等于冷却介质温度的工作制。短时工作制分为:主触点闭合10min,30min,60min和90min 4种。

2.5 起动特性

起动控制装置的自耦变压器,应根据下列特性进行设计。

2.5.1 起动电流

在额定电压下,电动机堵转时的起动电流不超过 $8I_N$ (当 $I_N \leq 100A$ 时)或 $7I_N$ (当 $I_N \geq 100A$ 时)。

2.5.2 起动时间 T_s

所有级别的各种工作制的起动时间 T_s ,均不得超过15s。每小时的起动周期次数,应按时间均匀分配。当两次快速的连接起动后,应使起动控制装置和自耦变压器冷却到周围空气温度,然后才允许再行起动。

当 T_s 需超过15s时,应由用户和制造厂签订专门的协议。

3 型式试验项目

一般检查、温升试验、介电性能试验、绝缘电阻测试、接地电阻测试、动作性能试验、热继电器动作性能试验、短路强度试验、自耦变压器空载试验、转换器件动作性能试验、自耦变压器湿热性能试验。

4 试验方法

装置的接地电阻测试、短路强度测试的试验方法见第2章。

4.1 一般检查

4.1.1 试验设备

数显尺,游标卡尺。

4.1.2 试验方法及要求

(1) 接线端子:通常一个端子上只能连接一根导线。将两根或多根导线连接到一个端子上,只有在端子是为此用途设计或经特殊工艺处理并经试验验证时才允许。

(2) 保护接地端子:

1) 起动控制装置的金属外壳应有接地螺钉(或螺母)。一般接地螺钉(或螺母)的螺径不小于M8,为保证使用时的良好接触,表面应有适当的防蚀措施,并禁止在螺钉(或螺母)的外表面和导线连接接触面喷涂不导电的覆盖层。

2) 保护接地端子除作保护接地之用外,不得兼作它用。

3) 为了识别接地端子,其上应用图形符号⊕或字母符号PE加以标志。接至内部保护接地导体上的接地线,必须为黄绿双色线,保护导体的截面积应符合第2章表6.2-11的要求。

(3) 起动控制装置的壳体:

1) 起动控制装置应由能承受一定的机械、电气和热应力的材料构成,同时应经得起在正常使用条件下可能会遇到的潮湿影响。

2) 起动控制装置面板应平整、匀称。所有焊接处应均匀、牢靠,且无明显变形或烧穿缺陷。

3) 门应在不小于90°的范围内灵活启闭,应装有能用相同钥匙打开的门锁。

4) 起动控制装置结构外表面,喷涂无眩目、反光的覆盖层。其颜色应均匀一致,表面应整洁、美观,不得有起泡、裂纹或流痕等缺陷。

(4) 外壳防护等级试验:见第2章。

(5) 组装要求:起动控制装置内导体截面积的选择由制造厂负责。除了必须承载的电流外,还受下述装置所承受的

机械应力、导体的敷设方法、绝缘类型和所连接的元件种类（如电子的）等条件的支配。

1) 按照有关电路的额定绝缘电压确定绝缘导线。铜心绝缘硬线的截面积不得小于 0.75mm²；铜心绝缘软线的截面积不得小于 0.5mm²。

2) 元器件间连接导线中间不应有接头或焊接点，应尽可能在固定的端子上接线。

3) 绝缘导线不应支靠在不同电位的裸带电部件和带有尖角的边缘上，应用适当的方法固定绝缘导线。

4) 连接在覆板或门上的电器元件的导线，应该使覆板和门的移动不会对导线产生任何机械损伤。

5) 装置应有接外引出线的接线端子排，对 63A 及以上的大电流外出线，也允许从接头上直接引出，接线座的位置应距安装基础面上方不小于 0.2m，以便引入电缆与之连接。

6) 装置中所属电路选配与标示的导线颜色应符合规定。当用不同的颜色标示不同电路用的导线时，除安全接地线和中性线须使用全长标示外，其他的标示也允许在黑色导线末端，用规定颜色的套管套标。

7) 主电路相序排列应依照第 2 章表 6.2-22 主电路相序排列。

(6) 元器件选择与安装：

1) 元器件选择应符合第 2 章 9.1.1 的规定。

2) 开关电器和元件应按制造厂说明书（使用条件、飞弧距离、隔弧板移动距离等）进行安装，应符合第 2 章 9.1.2 的规定。

(7) 黑色金属件的处理：所有黑色金属件均应覆盖有可靠的被覆层，紧固处还应有防松措施。

(8) 电气间隙、爬电距离：

1) 电气间隙：依据起动控制装置中各个电路的额定冲击耐受电压，各导电部件间的电气间隙不应小于表 6.12-1 规定。

表 6.12-1 最小电气间隙	
额定冲击耐受电压 (kV)	最小电气间隙 (mm)
0.33	0.8
0.5	0.8
0.8	0.8
1.5	0.8
2.5	1.5
4	3
6	5.5
8	8
12	14

2) 爬电距离：依据起动控制装置中各个电路的额定绝缘电压，各导电部件间的最小爬电距离应不小于表 6.12-2 规定。

表 6.12-2		最小爬电距离			
设备额定绝缘电压或实际工作电压 (交流方均根值) (V)	最小爬电距离 (mm)				
	I	II	III a	III b	
10	1	1	1	1	
12.5	1.05	1.05	1.05	1.05	
16	1.1	1.1	1.1	1.1	
20	1.2	1.2	1.2	1.2	
25	1.25	1.25	1.25	1.25	

续表

设备额定绝缘电压或实际工作电压 (交流方均根值) (V)	最小爬电距离 (mm)			
	I	II	III a	III b
32	1.3	1.3	1.3	1.3
40	1.4	1.6	1.8	1.8
50	1.5	1.7	1.9	1.9
63	1.6	1.8	2	2
80	1.7	1.9	2.1	2.1
100	1.8	2.0	2.2	2.2
125	1.9	2.1	2.4	2.4
160	2.0	2.2	2.5	2.5
200	2.5	2.8	3.2	3.2
250	3.2	3.6	4	4
320	4	4.5	5	5
400	5	5.6	6.3	6.3
500	6.3	7.1	8	8
630	8	9	10	10
800	10	11	12.5	
1000	12.5	14	16	
1250	16	13	20	

注 I、II、III a、III b 为材料组别。

4.2 温升试验

4.2.1 主电路的温升试验

主电路的温升试验在主电路的额定电流下进行。起动控制装置应处于正常运转状态。对于断续周期工作制操作频率为 12 级及以上的起动装置，自耦变压器起动时可能显著影响外壳内部的温度时，试验应按起动装置的额定工作制和起动特性，计算自耦变压器的消耗功率，它相当于起动时自耦变压器的平均消耗功率。试验方法见第 2 章。

4.2.2 自耦变压器绕组的温升试验

通过自耦变压器各个绕组的电流，应等于所控电动机在最大起动电流和起动时间下运行的等效发热电流。电动机堵转时的起动电流不超过 8I_N（当 I_N≤100A 时）或 7I_N（当 I_N≥100A 时），在起动时间内，自耦变压器输出电流等于最大起动电流乘以 0.8，再乘以起动电压与额定工作电压之比。对适应于断续周期工作制、操作循环为 3、12、30 级的起动装置，应对自耦变压器进行温升试验。

操作循环应以每小时的起动次数，从时间上给予均匀分配。

按 3.5 工作时，自耦变压器绕组的温升，不得超过表 6.12-3 的规定。在两次接连操作循环的情况下，自耦变压器的温升允许超过表 6.12-3 的规定，但不得损坏自耦变压器。

试验应在自耦变压器处于消耗功率为最大抽头的状态下进行。

为了使温升达到稳定值，试验时间应足够长，但不能超过 8h。

4.2.3 试验结果判定

主电路各部位的温升应符合第 2 章表 6.2-4 的规定。自耦变压器绕组的温升不得超过表 6.12-3 规定。

表 6.12-3 变压器绕组温升极限值

绝缘等级	允许温升（用电阻法测定）（K）
A	100
E	115
B	125
F	150
H	175

注 线圈在空气中的温升极限是按周围空气平均温度为+20℃条件下推荐的，对年平均温度超过 20℃条件下的绝缘线圈，由制造厂与用户协商。

4.3 介电性能试验

4.3.1 主电路和辅助电路的耐压

见第 2 章介电性能试验。

辅助电路在进行介电性能试验时，对不能承受试验的元器件，如半导体管、电容等，应于试验前将其拆除或短接。

4.3.2 自耦变压器的耐压

自耦变压器应能承受 1min 交流正弦波 3000V（方均根值）的介电试验电压。

4.3.3 试验结果判定

无击穿或闪络现象为合格。

4.4 绝缘电阻测试

用电压至少 500V 的绝缘测试仪器检测绝缘电阻，起动装置中各个电路进行介电性能试验前（或后）所测得的绝缘电阻值，不得低于 1MΩ。

4.5 动作性能测试

4.5.1 试验设备

调压器、电压表（0.5 级）。

4.5.2 试验方法及要求

检查起动装置的内部接线正确无误后，在控制电路通以额定电压的 85% 和 110% 的条件下，各操作 5 次应无误动作，且保证各个电器元件动作灵活，顺序准确。

该项试验中，要验证时间继电器，欠电流继电器或时间—电流转换装置动作是否准确。试验操作必须在各个电器线圈处于热态下进行。

4.6 热继电器动作性能试验

4.6.1 试验设备

调压器、升流器、电流表（0.5 级）。

4.6.2 试验方法及要求

（1）对不带断相运转保护的热继电器，其技术要求应符合 GB/T 14048.4—1993 中 7.2.1.5.1 的规定。

延时过载继电器按如下要求进行试验时，除非周围空气温度另有规定，继电器应符合表 6.12-4 的要求。

1) 通常装在外壳内的过载继电器或起动器，周围空气温度对应于表 6.12-4 规定值。在 A 倍整定电流时，从冷态开始在 2h 内不脱扣，但是过载继电器接线端子在试验电流下小于 2h 就已达到热平衡时，则试验所需的时间可取为达到热平衡所需的时间。

2) 当电流接着上升到 B 倍整定电流时，应在 2h 内脱扣。

3) 对于脱扣级别为 10A 级的过载继电器，在整定电流下达动热平衡后，开始通以 C 倍整定电流，应在 2min 内

脱扣。

4) 对于脱扣级别为 10, 20, 30 级的过载继电器，在该整定电流下达到热平衡后，开始通以 C 倍整定电流，应分别在 4s 和 2min 内脱扣。

5) 从冷态开始脱扣器在 D 倍整定电流下，对应相应脱扣级别的脱扣器应在表 6.12-5 给出的极限值内脱扣。

对电流整定值可调的过载继电器，动作极限值对于继电器承载相应最大整定电流和承载相应最小整定电流均应适用。

对于无补偿的过载继电器，其电流倍数/周围空气温度特性应不大于 1.2%/K。

表 6.12-4 延时过载继电器各级同时通电时的动作范围

过载继电器型式	整定电流倍数				周围空气温度
	A	B	C	D	
热式无周围空气温度补偿、电磁式	1.0	1.2	1.5	7.2	+40℃
热式有周围空气温度补偿	1.05	1.2	1.5	7.2	+20℃

表 6.12-5 热、电磁式固态过载继电器的脱扣级别和脱扣时间

级别	在表 6.12-4 中 D 列规定条件下的脱扣时间 T_P (s)
10A	$2 < T_P \leq 10$
10	$4 < T_P \leq 10$
20	$6 < T_P \leq 20$
30	$9 < T_P \leq 30$

- 注 1. 按继电器的类型给出了脱扣条件。
2. 对于转子变阻式起动器，过载继电器通常接在定子电路中。过载继电器不能有效地保护转子电路，特别是电阻器（通常，起动器在故障条件下起动时，电阻器比转子本身和开关电器更易损坏），因此，转子电路的保护应符合制造厂和用户的协议。如用户有要求，可用特殊布置的方法来防止转子接触器和电阻器过热。
3. 对于两极自耦减压起动器，起动用自耦变压器一般仅在起动时间内使用，如在故障条件下起动时，自耦变压器不能受到过载继电器的有效保护，因此，自耦变压器的保护应符合制造厂和用户的协议。
4. 考虑到不同的热元件特性和制造误差，可选择 T_P 的下限值。

（2）三极热过载继电器两极通电时动作范围：装在外壳内的过载继电器或起动器应在外壳内试验。对于三极通电的继电器，在表 6.12-6 规定的周围空气温度下，从冷态开始通以 A 倍整定电流，在 2h 内不脱扣。紧接着当两极的电流值（对于断相保护继电器，应通以较大的电流）增加到 B 倍整定电流且第三极不通电时，应在 2h 内脱扣。

上述极限值适用于各级所有不同组合的情况。

对整定值可调的热过载继电器，其特性对于继电器承载相应最大整定电流和承载相应最小整定电流均应适用。

表 6.12-6 三极热继电器仅两极通电时的动作范围

过载继电器型式	整定电流倍数		周围空气温度（℃）
	A	B	
有周围空气温度补偿、无断相保护	3 级 1.0	2 级 1.32, 1 级 0	+20
无周围空气温度补偿、无断相保护	3 级 1.0	2 级 1.25, 1 级 0	+40
有周围空气温度补偿、有断相保护	2 级 1.0, 1 级 0.9	2 级 1.15, 1 级 0	+20

保护特性:

1) 过热保护: 见 4.6.2 中 (1) 2)。

2) 断相保护: 起动装置应能对由于电机或其他断相而引起的过电流进行保护, 应能及时停止电动机运转。主电路和控制电路应具有检测断相和停止电动机运行及显示报警等措施。

3) 短路保护: 主电路应有短路保护, 其整定值应能承受电动机起动电流的冲击, 而不会发生误动作。当主电路发生短路而切断电路时, 应同时自动将主电路中开关电器的控制操作电路切断。必要时, 应能发出相应的报警与联动信号。

控制电路的电源引入端, 应有作短路保护用的电器。

主电路母线的安放, 应在正常工作的条件下, 不致发生线间短路。当起动装置的输出电路或装置内部发生短路时, 保护系统应能正确工作。同时, 在短路保护装置所允许的预期短路电流的冲击下, 装置中的母线(电缆)的绝缘和绝缘部件不应发生任何损伤。各连接紧固处的螺钉, 也不得松动。各个导电部件间的电气间隙和爬电距离, 仍应维持原有的间距状态。

起动控制装置应具有避免由于工作人员误操作而使电动机直接起动的装置或措施。

4.7 自耦变压器空载试验

4.7.1 试验设备

0.5 级电压表, 0.5 级电流表。

4.7.2 试验方法及要求

自耦变压器在空载条件下, 一次侧接三相额定工作电压, 用 0.5 级电流表测量各相空载电流, 应小于 20% I_N (I_N 为额定工作电流)。

自耦变压器的空载变压比试验是在空载状态下, 一次侧接三相工作电压, 用电压表测量空载电压变压比, 二次侧抽头电压比的误差不得超过 ±3%。

4.8 转换器件动作性能试验

4.8.1 试验设备

升流器, 计时仪, 电流表。

4.8.2 试验方法及要求

进行此试验时, 主电路可单独通以由低压试验机组或变压器供电的符合下述规定的电流值, 以验证其动作性能。

用欠电流继电器或时间—电流转换装置自动地从起动位置转换到运转位置, 其最小释放电流 I_i 应不小于电动机额定电流的 1.5 倍, 并能通过从最小整定电流至起动位置上的堵转电流之间的任何电流值, 其时间决定于过电流继电器在其最大整定电流下的脱扣时间或自耦变压器所允许的通电时间 T 。

$I_i: 1.5I_N \leq I_i \leq 7I_N \text{ 或 } 8I_N。$

T : 自耦变压器通电时间, 不得超过 15s。

4.9 自耦变压器湿热性能试验

4.9.1 试验设备

升流器, 计时仪, 电流表。

4.9.2 试验方法及要求

起动装置中的自耦变压器, 应能承受交变湿热试验(试验 Db) 的考核。Db 试验箱的有效工作(见 GB/T 2423.4 的规定) 温度, 应能在 (25±3)℃ 与 (40±2)℃ 之间循环变化。Db 交变湿热周期条件应符合表 6.12-7 的规定。试验严酷等级采用的周期数为 6 天。检测应在“条件试验过程”中进行, 即在低温高湿阶段最后的 1~2h 测量。此时, 试验箱中的湿度宜控制在不低于 95%, 并应避免在产品表面产生凝露。一般先测量绝缘电阻(不低于 0.5MΩ), 再做介电性能试验。试验电压值应为第二章介电性能试验中试验电压值的 80%。

表 6.12-7 湿热试验条件

阶段	温度(℃)	相对湿度(%)	持续时间(h)	
升温	25~40	≥95 (允许在试表面产生凝露)	3±0.5	12
高温高湿	40±2	93±3	9	
降温	40~25	>85	3~6	12
低温高湿	25±3	>95	6~9	

第13章 低压无功功率补偿装置试验

1 简述

本章所述的试验方法、检测技术主要是用于低压无功功率补偿装置(以下简称装置)的试验。主要依据 GB/T 15576—1995 低压无功功率静态补偿装置总技术条件、JB/T 9663—1999《低压无功功率自动补偿控制器》、JB/T 10695—2007《低压无功功率动态补偿装置》和 GB 7251.1《低压成套开关设备和控制设备 第一部分:型式试验和部分型式试验成套设备》,包括了目前低压无功功率补偿装置主要试验及检测。

2 型式试验项目

一般检查、通电操作试验、工频过电压保护试验、温升试验、介电强度试验、放电试验、涌流试验、机械操作试验、保护电路有效性试验、缺相保护试验、防护等级试验、短路保护与短路耐受强度试验、动态响应时间测试、环境温度性能试验、电磁兼容(EMC)试验、噪声测试。

3 试验方法

装置的介电强度试验、机械操作试验、保护电路有效性试验、防护等级试验、短路保护与短路耐受强度试验、电磁兼容(EMC)试验的试验方法见第2章。

3.1 一般检查

3.1.1 使用设备

游标卡尺(0.02mm),卷尺(1mm)。

3.1.2 试验方法及要求

(1) 结构:

1) 装置应由能承受一定的机械、电气和热应力的材料构成,应承受元件安装或短路时可能产生的机械应力和热应力。同时,不因装置的吊装、运输等情况影响装置的性能,在正常使用条件下应经得起可能会遇到的潮湿影响。

2) 装置的门应在不小于90°的范围内能灵活起闭。

3) 装置的壳体外表面,一般应喷涂无眩目反光的覆盖层,表面不应有起泡、裂纹或流痕等缺陷。

4) 装置内所有金属紧固件均应有合适的镀层,镀层不应起皱、脱落、变色及生锈。

5) 装置的焊接件应焊接牢固,焊缝应均匀美观,无焊穿、裂纹、咬边、残渣、气孔等现象。

6) 装置内母线的相序排列从装置正面观察,应符合第2章中表6.2—23的规定。

(2) 电器元件选择和安装:

1) 装置中所选用的电器元件及辅件的额定电压、额定电流、使用寿命、接通和分断能力、短路强度及安装方式等方面应适合指定的用途及本身相关标准。

2) 所有电器元件及辅件应按照其制造厂的说明书(使用条件、需要的飞弧距离、拆卸灭弧栅需要的空间等)进行安装。元件的布置应整齐、端正,便于安装和接线,并应设有与电路图一致的符号或代号。

3) 电器元件及辅件的安装应便于接线、维修和更换,需要在装置内部操作调整和复位的元件应易于操作。

4) 与外部连线的接线座应固定在装置安装基准面上方至少0.2m高度处。仪表的安装高度一般不应高出装置安装基准面2m。操作器件(如手柄、按钮等)的安装高度,其中心线一般不应高于装置基础面2m。紧急操作器件应装在距装置安装基准面的0.8~1.6m范围内。

(3) 指示灯及按钮:装置中所选用的指示灯和按钮的颜色应符合第2章中表6.2-20的规定。

(4) 母线及绝缘导线:

1) 装置中所选用的导线及母线的颜色应符合 GB 7947的规定。

2) 装置中的连接导线,应具有与额定工作电压相适应的绝缘,一般宜采用铜芯多股绝缘软线。

3) 装置的绝缘导线应采用冷压接端头与电器元件连接。冷压接端头与绝缘导线的配合以及压接装置应符合标准的规定。

4) 母线的材料、连接和布置方式以及绝缘支持件应具有承受装置的预期短时耐受电流能力。

5) 装置的布线应整齐美观,不应贴近具有不同电位的裸露带电部件或有尖角的边缘进行敷设,布线时应采用适当的支撑或装入行线槽内。

6) 连接安装在门上的电器元件的导线,设计时应考虑门开闭时不使这些导线承受过大的张力或遭受任何机械损伤。

7) 一个连接端子只能连接一根导线,必要时允许连接两根导线,但应采取适当措施。

8) 主电路母线或导线的截面积应根据其允许载流量不小于可能通过该电路额定工作电流来选定。

9) 辅助电路导线的截面积应根据要承载的工作电流来选择,但应不小于1.0mm²(铜芯多股绝缘软线)。

10) 电容器支路导线的载流量应不小于电容器额定工作电流的1.5倍。

(5) 电气间隙和爬电距离:

1) 装置内的电器元件应符合各自的有关规定,在正常使用条件下,应保持其电气间隙和爬电距离。

2) 装置内不同极性的裸露带电体之间,以及它们与地之间的电气间隙和爬电距离应符合第2章6的规定。

(6) 安全防护:

1) 对直接接触电的防护可以依靠装置本身的结构措施,也可依靠装置在安装时采取的附加措施,制造厂应在使用说明书中提供这种资料。

2) 对间接接触电的防护应采用装置内的保护电路。保护电路可通过单独装设保护导体来完成,也可利用装置的结构部件(如外壳、框架等)来完成。

3) 装置内保护电路的所有部件的设计应使它们足以耐受设备在安装场所可能遇到的最大热应力和电动应力。

4) 保护导体的截面积应不小于第2章表6.2-11的规定值。

- 5) 为便于识别, 保护导体的颜色应采用黄绿双色。黄绿双色除作为保护导体的识别颜色外, 不应用于其他用途。
- (7) 铭牌和标识:
- 1) 在装置的铭牌上应标明: 制造商(生产厂)或商标、产品名称、产品型号、标准代号、制造日期(或编号)或生产批号、额定电压、额定频率、额定补偿容量。
- 2) 外接保护导体的端子应有标注, 如果外部保护导体与能明显识别的带有黄绿双色的内部保护导体连接时, 则不要求标注。
- 3) 电容器未放电前, 接触会造成危险, 要求装有警告标志。

3.2 通电操作试验

- 3.2.1 使用设备
交流电源, $\pm 15\%$ 额定电压可调的调压器。
- 3.2.2 试验方法及要求

试验前需先检查装置的内部接线, 当所有接线正确无误后通以额定电压的 85% 和 110% 的条件下, 各操作 5 次, 所有电器元件的动作显示均应符合电路图的要求, 且各个电器元件动作灵活。

3.3 工频过电压保护试验

- 3.3.1 使用设备
交流电源, 调压器。
- 3.3.2 试验方法及要求

做本项试验时, 应将电容器拆除, 然后给装置接上电源, 并将电容器投切开关闭合, 调整电源电压等于或略大于 1.1 倍额定电压, 过电压保护设施应在 1min 内将电容器全部切除。

3.4 温升试验

温升试验时, 应对电容器单元施加额定电压, 在整个试验过程中, 电压值应使电容器支路的电流不小于其额定电流。其他见第 2 章。

3.5 放电试验

- 3.5.1 使用设备
直流电压表 (0.5 级), 秒表。
- 3.5.2 试验方法及要求
- 放电试验可以在任何一组电容器上进行, 用直流法将电容器充电至额定电压峰值, 然后接通放电装置。
- 放电波形见图 6.13-1。

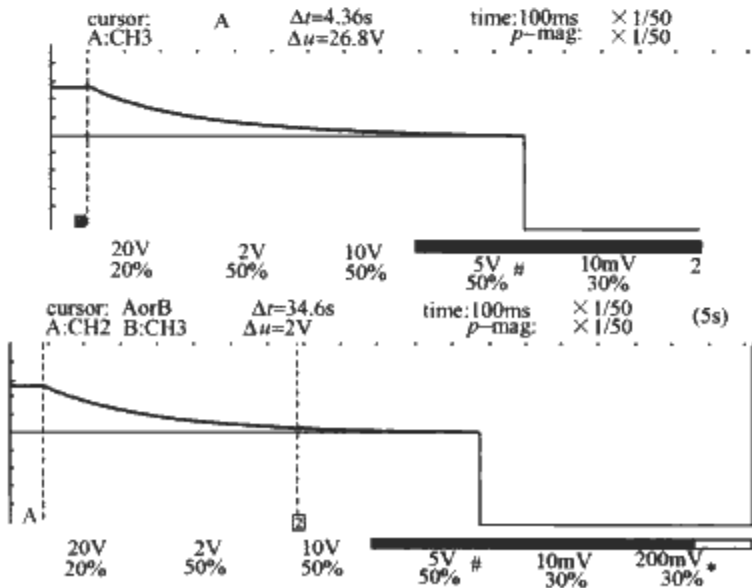


图 6.13-1 放电波形图

- 3.5.3 试验结果判定
- 放电设施应保证电容器断电后, 从额定电压峰值放电至 50V, 历时不大于 1min, 则为合格。

3.6 涌流试验

- 3.6.1 使用设备
分流器、示波器或电流传感器。
- 3.6.2 试验方法及要求
- 涌流试验只验证投入最后一组电容器时电路中的涌流值, 即先将其余电容器全部接上额定电压, 待它们工作稳定后再投入最后一组电容器, 将分流器串接在最后一组电容器的电路中, 通过示波器观察涌流值。

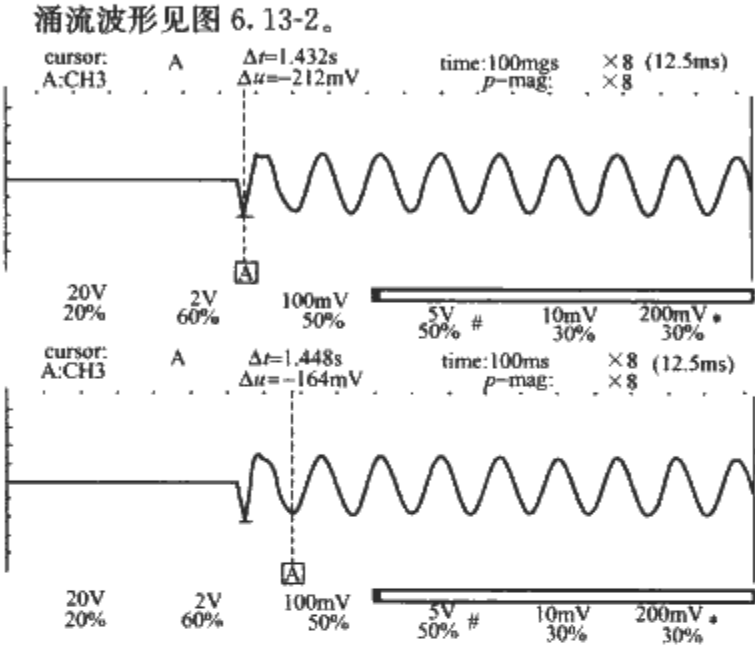


图 6.13-2 涌流波形图

- 3.6.3 试验结果判定
- 装置中电容器投入瞬间所产生的涌流值: 接触器投切方式的补偿装置不大于该组电容器额定电流峰值的 100 倍; 晶闸管投切方式的装置不大于该组电容器额定工作电流的 3 倍, 则为合格。
- 注意: 通常接触器投切涌流倍数为电容器额定电流峰值 50 倍左右; 晶闸管投切倍数为电容器额定电流峰值 1.5 倍左右。

3.7 缺相保护试验

- 3.7.1 使用设备
断路器。
- 3.7.2 试验方法及要求
- 将装置电容器全部投入运行, 用断路器将主电路或支路的任何一相断开, 缺相保护应保证将全部或支路电容器切除。

3.8 动态响应时间测试

- 3.8.1 使用设备
高性能记录仪、霍尔元件、感性负载。
- 3.8.2 试验方法及要求
- 将装置放在自动工作状态, 给装置施加额定电压, 投入感性负载。由于感性负载的电压可以突变, 所以检测其电压信号, 并记录该时间为 T_1 ; 由于电容器的电流可以突变, 所以应检测其电容器的电流信号, 同时记录补偿电容器电流发生变化的时刻 T_2 。则 $T_2 - T_1$ 即为装置的动态响应时间 T 。
- 动态响应时间波形见图 6.13-3。

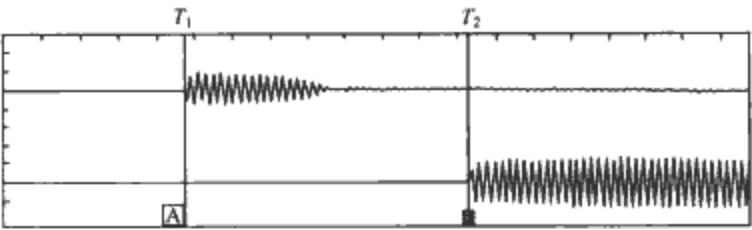


图 6.13-3 动态响应时间波形图

3.8.3 试验结果判定

若装置的动态响应时间小于或等于 2s，则为合格。

3.9 环境温度性能试验（仅适用于户外型装置）

环境温度性能试验是考核户外型无功功率动态补偿装置在规定的环境空气温度上限和下限情况下长期运行的可靠性。

3.9.1 使用设备

高低温试验箱。

3.9.2 试验方法及要求

将装置分别置于规定的最高环境空气温度 $40^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$

和最低环境空气温度 $-25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 的条件下，然后给装置接通电源，待装置内部元件的温升达到稳定值后（应不少于 4h），观察装置的各种动作功能。

3.9.3 试验结果判定

若装置的各种动作功能均准确无误为合格。

3.10 噪声测试

3.10.1 试验设备

声级计，其准确度等级为 2 级。

3.10.2 试验方法及要求

试验在周围 2m 内没有声音反射面的场所进行。装置处在正常运行状态下，在正对装置操作面 1m 处测量，测量时声级计应正对装置噪声源，沿被试设备表面移动，按每间隔 1m（不能小于 0.5m）作为一个参考点。测量采用 A 声级，测试时尽量避免周围环境噪声对测量结果的干扰。

3.10.3 试验结果判定

装置运行所产生的噪声不大于 60dB 为合格。

第 14 章 低压无功补偿控制器试验

1 简述

本试验方法及检测技术主要是用于动态、静态低压无功补偿控制器（以下简称控制器），包括功率因数型控制器、无功电流型控制器、无功功率型控制器等低压无功补偿控制器试验。

本试验方法可供低压无功补偿控制器生产厂家在产品检验时参考。主要依据 JB/T 9663—1999《低压无功功率自动补偿控制器》；DL/T 597—1996《低压无功补偿控制器订货技术条件》

2 型式试验项目

一般检查、电气性能试验、连续运行试验、高低温储存试验、环境温度性能检验、介电强度试验、抗干扰试验、振动试验、防护等级检验、跌落冲击检验。

3 试验方法

装置的介电强度试验、防护等级检验的试验方法见第 2 章。

3.1 一般检查

3.1.1 试验设备

目测。

3.1.2 试验方法及要求

（1）外观检查：控制器外形尺寸及安装尺寸，元件的焊接、装配、端子编号等，应符合产品图样及有关标准的要求。控制器采用金属外壳时，应提供接地端子并应设有明显接地标志，接地端子可采用不小于 M4 的螺钉。控制器采用的紧固件和调整件要有锁紧措施，以保证在正常使用条件下不会因振动而松动或移位。

（2）标志检查：每台控制器都应设有铭牌，字迹应清晰、耐久。铭牌内容至少有：控制器的名称、型号、制造商名称、商标、额定工作参数、出厂年月及编号。

3.2 电气性能试验

3.2.1 测试控制器灵敏度

（1）试验设备：三相标准校验装置。

（2）试验方法及要求：测试时先把输出电路的接通和分断的动作延时时间调至最短。

1) 当取样物理量为无功功率或无功电流时，先根据投入门限动作要求将 I_s 调至由产品企业标准规定的数值，保持 I_s 不变而变动 $\cos\varphi$ ，输出电路接通时的 I_s 即为控制器的接通灵敏度。接着根据切除门限动作要求将 I_s 调至由产品企业标准规定的数值，保持 I_s 不变而变动 $\cos\varphi$ ，输出电路分断时的 I_s 即为控制器的分断灵敏度。

2) 当取样物理量为功率因数时，先将 $\cos\varphi$ 调至规定投入或切除门限，保持 $\cos\varphi$ 不变，调节 I_s ，使 I_s 从零逐渐增大至输出电路接通（分断），此时 I_s 即为控制器的接通（分断）灵敏度。

（3）试验结果的判定：控制器的检测灵敏度应满足投入门限和切除门限的动作要求规定，其投入门限与切除门限的设定值在产品企业标准中具体给出。

3.2.2 测试控制器的动作误差

（1）试验设备：三相标准校验装置。

（2）试验方法及要求：

1) 如果控制器的取样物理量为无功功率或无功电流，测试时先在滞后条件下将 I_s 依次调整到 $I_s = I_{smin}$ 、 $I_s = 10I_{smin}$ 、 $I_s = 20I_{smin}$ ，保持 I_s 不变，改变 $\cos\varphi$ 使输出电路接通，分别记录接通时的 I_s 和 $\cos\varphi$ 值。接着在超前条件下将 I_s 依次调整到 $I_s = I_{smin}$ 、 $I_s = 10I_{smin}$ 、 $I_s = 20I_{smin}$ ，保持 I_s 不变，改变 $\cos\varphi$ 使输出电路分断，分别记录此时的 I_s 和 $\cos\varphi$ 值，然后，通过计算得到实测值。

实测值（无功功率）= $\sqrt{3}U_s I_s \sin\varphi$

实测值（无功电流）= $I_s \sin\varphi$

式中： I_s 为电流取样输入值，A； U_s 为电压取样输入值，V； φ 为 U_s 与 I_s 的相位差。

2) 如果控制器取样物理量为功率因数 $\cos\varphi$ ，测试时先将 I_s 依次调整到 $I_s = I_{smin}$ 、 $I_s = 2A$ 、 $I_s = 4A$ ，然后改变 $\cos\varphi$ ，当输出电路接通（分断）时记录对应的 $\cos\varphi$ 值。

3) 控制器动作误差按下式计算求得

动作误差 = (实测值 - 设定值) / 设定值 $\times 100\%$

（3）试验结果判定：

1) 对控制物理量为功率因数的控制器，其投切门限设定范围应在 0.90（滞后）~0.98（超前）之间可调，动作误差符合表 6.14-1 的规定为合格。

表 6.14-1 控制器的动作误差

取样物理量	允许误差
无功功率	$\pm 20\%$
无功电流	$\pm 20\%$
功率因数	$\pm 2.5\%$

2) 对控制物理量为无功功率或无功电流的控制器，其投切门限的设定范围应在产品企业标准中具体给出，动作误差符合表 6.14-1 的规定为合格。

3.2.3 测试过电压保护动作值及回差

（1）试验设备：三相标准校验装置。

（2）试验方法及要求：测试时先给控制器接通电源，调整取样输入使控制器输出电路处于接通状态，然后慢慢增大 U_s ，当输出电路分断时，记录此时的 U_s 。接着慢慢减小 U_s ，当输出电路又有接通动作时，记录此时的 U'_s 。 $U_s - U'_s$ 即为过电压的动作回差， U_s 即为过电压保护动作值。

（3）试验结果的判定：

1) 控制器的过电压设定值，输出电路分断延时时间及回差值应满足产品企业标准规定。

2) 电压取样输入等于或高于过电压设定值时，输出电路应逐个进行分断，其时间不允许超过电力电容器过电压时的允许工作时间。

3) 电压取样输入低于过电压设定值并且在回差值范围内时, 输出电路应解除过电压引起的分断功能, 且封锁其接通的功能。

4) 电压取样输入低于过电压设定值并且在回差值范围以外时, 输出电路恢复正常的接通与分断功能。

符合上述要求为合格。

3.2.4 测试输出电路的动作延时

- (1) 试验设备: 三相标准校验装置, 秒表, 波形记录仪。
- (2) 试验方法及要求:
 - 1) 过电压分断的动作延时: 测试输出电路的过电压分断动作延时, 应先将控制器接通电源, 并调整取样输入, 使输出电路处于接通状态, 然后调整 U , 使其大于过电压的动作值, 并同时用秒表计时, 到输出电路分断时的时间间隔即为过电压分断延时, 记录此时的时间。
 - 2) 正常工作的接通动作延时:
 - a. 对于静态补偿控制器, 测试输出电路接通动作的延时时间, 应先给控制器接通电源, 将延时时间调至最短, 然后调整取样输入, 使取样物理量低于投入门限时开始用秒表计时, 当输出电路接通的时间间隔即为控制器接通的最短延时时间。将延时时间调至最长, 重复以上过程, 测试出控制器接通时的最长延时时间。
 - b. 对于动态补偿控制器, 测试输出电路接通动作的延时时间, 应先给控制器接通电源, 然后调整取样输入, 使取样物理量低于投入门限, 将输出电路接通, 用波形记录仪测量取样物理量变化时刻及输出电路接通时刻, 从波形上得出控制器的延时时间。
 - 3) 正常工作的分断动作延时: 测试控制器输出电路分断时延时时间与正常工作的接通动作延时相同, 不同的是应调整取样输入使取样物理量超过控制器的切除门限。
 - 4) 控制器正常工作的接通与分断的动作延时时间按表 6.14-2 规定。

表 6.14-2 控制器输出接通、分断延时时间	
无功功率自动补偿控制器	延时时间调整范围
静态补偿	$\geq 90s$
动态补偿	20~2000ms

- (3) 试验结果判定:
 - 1) 控制器过电压分断的动作延时时间满足产品企业标准规定为合格。
 - 2) 控制器正常工作的接通与分断的动作延时时间满足表 6.14-2 的规定为合格。

3.3 连续运行检验

- 3.3.1 试验设备
连续运行试验装置。
- 3.3.2 试验方法及要求

- (1) 为保证控制器工作的可靠性, 试验在室温条件下进行, 将控制器延时时间调至最短, 运行时间不少于 24h。
- (2) 将控制器的输入端接在连续运行试验装置上, 该装置能循环不断地模拟输出感性和容性负载 (感性负载指取样电流相位滞后取样电压; 容性负载指取样电流相位超前取样电压), 被测控制器接收到取样电压和电流信号后自动进行循环投切, 直到所设定的连续运行时间为止。

- 3.3.3 试验结果判定
连续运行试验中控制器的动作及功能正确无误为合格。

3.4 高低温储存试验

- 3.4.1 试验设备
高低温试验箱。
- 3.4.2 试验方法及要求
 - (1) 高低温储存试验用于考核控制器在高温、低温环境下储存、运输的适应性。试验时控制器不包装、不通电。
 - (2) 先将控制器置于温度为 $-25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 的低温箱中连续存放 24h, 然后使控制器逐渐恢复到室温; 再将控制器置于温度为 $+70^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 的高温箱中连续存放 24h, 然后取出置于试验室内的环境温度下恢复; 待控制器恢复到室温后测试其电气性能。
- 3.4.3 试验结果判定
高低温储存试验后, 测试其电气性能符合本章 3.2 电气性能试验要求为合格。

3.5 环境温度性能检验

- 3.5.1 试验设备
高低温试验箱, 三相标准校验装置。
- 3.5.2 试验方法及要求
 - (1) 环境温度性能试验是考核控制器在环境温度上限和下限情况下长期运行的可靠性。
 - (2) 对于户内型控制器, 应分别置于规定的最高环境温度 $+40^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 和最低环境温度 $-5^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 的条件下; 对于户外型控制器, 应分别置于规定的最高环境温度 $+40^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 和最低环境温度 $-25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 的条件下, 然后给控制器接通电源, 待控制器内部元件的温升达到稳定后 (但不小于 1h) 测试其电气性能。
- 3.5.3 试验结果判定
试验过程中, 测试其电气性能符合本章 3.2 电气性能试验要求为合格。

3.6 抗干扰试验

抗干扰试验是考核控制器对特定的外加干扰条件的耐受能力。对于静态控制器, 抗干扰试验包括入口抗干扰试验和出口抗干扰试验两个程序; 对于动态控制器, 则只包括入口抗干扰试验。试验按图 6.14-1 所示连接。

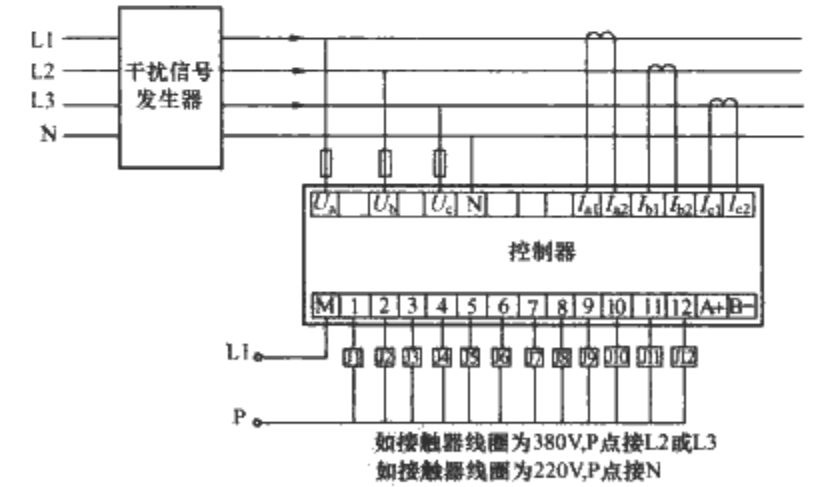


图 6.14-1 控制器抗干扰试验接线图

- 3.6.1 入口抗干扰试验
 - (1) 试验设备: 单脉冲干扰模拟器, 脉冲群干扰模拟器。
 - (2) 试验方法及要求: 入口抗干扰试验是把尖脉冲电压以共模方式叠加在装置的交流控制电源上。

1) 采用下述参数的单脉冲试验:

试验电压: 不小于 1000V。

脉冲宽度: $0.1\mu\text{s}$ 。

脉冲周期: 20ms。

脉冲极性: 正 (+) 和负 (-)。

脉冲相位: $0\sim 360^\circ$ 。

施加的时间: $\geq 1\text{min}$ 。

2) 采用下述参数的脉冲列干扰试验:

试验电压: 不小于 500V。

脉冲持续时间: 50ns。

脉冲上升时间: 5ns。

脉冲周期: 200ns。

脉冲列宽周期: 15ms。

脉冲列周期: 300ms。

脉冲极性: 正 (+) 和负 (-)。

(3) 试验结果判定: 在施加干扰时, 控制器的各项功能及程序正常为合格。

3.6.2 出口抗干扰试验

(1) 试验设备: 出口抗干扰试验装置。

(2) 试验方法及要求: 出口抗干扰试验采用负载试验, 将静态控制器的输出电路按其产品企业标准的规定接上实际负载运行, 每一支路进行 10 次投切动作。

(3) 试验结果判定: 在施加干扰时, 控制器的各项功能及程序正常为合格。

3.7 振动试验

3.7.1 试验设备

振动试验装置。

3.7.2 试验方法及要求

(1) 振动试验是考核控制器经受振动的适应性和结构的完好性。振动试验采用扫频试验法, 按规定条件在 3 个相互垂直的轴向进行扫频试验。试验时控制器处于带电工作状态。

(2) 振动频率为 $10\sim 58\text{Hz}$ 时采用恒定位移法, 单振幅为 0.15mm ; 当振动频率为 $58\sim 150\text{Hz}$ 时, 宜采用恒定加速度法, 加速度为 20m/s^2 ; 每个方向的扫描时间为 10min, 往复扫描一次时间为 $2\sim 2.5\text{min}$ 。

3.7.3 试验结果判定

(1) 试验中输出电路及各功能显示均正常为合格。

(2) 试验后, 样品的构件无破裂、明显变形, 紧固件及插接件无松动, 调节部件无位移等现象为合格。

3.8 跌落冲击检验

3.8.1 试验设备

跌落冲击试验装置。

3.8.2 试验方法及要求

控制器不带外包装条件下进行跌落冲击试验, 试验用的地面为平滑、坚固的水泥地面或钢质试验面。控制器底面与地面的夹角不大于 3° , 跌落高度 50mm (控制器底面距地面的最短距离), 跌落冲击 3 次, 试验后测试其电气性能。

3.8.3 试验结果的判定

(1) 试验后检查控制器外形及构件无破裂和明显变形现象为合格。

(2) 试验后, 测试其电气性能符合本章 3.2 电气性能检验要求为合格。

第15章 节电装置试验

1 简述

本章所述的试验方法、检测技术主要用于电机节电装置、照明节电装置等降压节电装置的试验。主要依据 CCEC/T 16.1—2003《电力省电装置节能产品认证技术要求第1部分：低压配电降压节电器》。

2 试验环境条件

所有试验应在环境温度 $-5\sim+40^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 95\%$ ，大气压力 $86\sim 106\text{kPa}$ 范围内进行。

3 型式试验项目

外观检查、介电性能验证、耐腐蚀、耐老化的验证、温升试验、电气间隙和爬电距离检测、保护电路有效性验证、防护等级验证、EMC 试验、电压稳定精度的检测、空载损耗和空载电流检测、负载损耗检测、输入侧功率因数检测、节电率检测。

4 试验方法

装置的外观检查、介电性能验证、温升试验、电气间隙和爬电距离检测、保护电路有效性验证、EMC 试验的试验方法见第2章。

4.1 耐腐蚀、耐老化的验证

4.1.1 湿热试验

(1) 试验设备：高低温湿热试验箱。

(2) 试验方法：见第17章。严酷等级—温度 55°C ，循环6次，变量为1。

(3) 试验结果判定：如未出现肉眼可见的锈斑、裂纹和其他损坏，则认为通过了此试验，但是防护层表面的蚀斑是允许的。

4.1.2 盐雾试验

(1) 试验设备：盐雾试验箱。

(2) 试验方法：见第17章。

(3) 试验结果判定：在节电装置内部及外部不应发现任何的腐蚀痕迹（陡缘除外）。

4.1.3 替换性

对于4.1所规定的节电装置耐腐蚀、耐老化试验是可替换的，试验可以在样机上进行，此样机应至少包括节电装置每种类型的元器件各一件，并包括经相同表面加工、防腐处理的各种材料。

4.2 温升试验

试验方法及要求：在环境温度为 $+40^{\circ}\text{C}$ 时，接线端子温升一般不超过 45K ，母排连接处（水平母排及垂直母排）不超过 70K ，半导体器件不超过 85K 。或各元器件温升限值由生产企业自行决定。其他见第2章。

4.3 防护等级验证

户外型节电装置防护等级不低于 IP43 ，户内型节电装

置防护等级不低于 IP30 及产品企业标准的要求为合格。其他见第2章。

4.4 电压稳定精度的检测

4.4.1 试验设备

试验设备为钳位功率计。

4.4.2 试验方法及要求

(1) 输入额定频率下的额定电压，在空载运行状态下，让节电装置处于节电状态，检测节电状态的输出电压与设定值相比较。

(2) 输入额定频率电压，在空载运行状态下，让节电装置处于节电状态，改变输入电压的有效值（例如 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ ），检测节电状态的输出电压值与额定输入电压状态下的相应值相比较。

4.4.3 试验结果判定

其输出电压稳定精度应 $\leq \pm 2\%$ 为合格。

4.5 空载损耗和空载电流检测

4.5.1 试验设备

试验设备为钳位功率计。

4.5.2 试验方法

输入额定频率的额定电压，在空载运行状态下，节电装置处于节电状态，检测每相空载电流和空载损耗。

4.5.3 试验结果判定

空载电流损耗 $\leq 0.3\%$ ，空载损耗 $\leq 0.7\%$ 为合格。

4.6 负载损耗检测

4.6.1 试验设备

试验设备为钳位功率计。

4.6.2 试验方法

(1) 输入额定频率的电压，输出端短接，短接线按节电装置额定截面选取，短接线长 $1\sim 2\text{m}$ ，让节电装置处于节电状态。调节输入电压，使输出短接电流达到额定电流，这时检测有功功率即为负载损耗。

负载损耗 $= (\text{实测有功功率}/\text{额定功率}) \times 100\%$

式中：实测有功功率为带节电装置时，在输出短接电流达到额定电流时检测到的有功功率；额定功率为节电装置标称的额定功率。

(2) 对于不能用4.6.2中(1)项要求做试验的节电装置，可以用测量效率来代替。

节电装置在额定输入条件下，带额定负载在节电状态下运行，测量输入、输出有功功率值。

效率 $= (\text{输出有功功率}/\text{输入有功功率}) \times 100\%$

4.6.3 试验结果判定

负载损耗满足 $\leq 2\%$ ，效率 $\geq 98\%$ 为合格。

4.7 输入侧功率因数检测

4.7.1 试验设备

试验设备为钳位功率计。

4.7.2 试验方法

在额定负载条件下，节电装置处于节电状态，检测节电装置输入侧的功率因数。

4.7.3 试验结果判定

功率因数 $\cos\varphi \geq 0.97$ 为合格。

4.8 节电率检测

4.8.1 试验设备

试验设备为钳位功率计。

4.8.2 试验方法

(1) 电磁式节电装置（例如部分照明节电装置）：

1) 节电装置输出端接入额定功率负载，负载功率因数 $\cos\varphi > 0.99$ 。如果条件限制可降低负载，但不能小于额定负载的 20%。输入电压在额定范围内，在节电装置处于节电状态下，测试仪器接在节电装置输入、输出端，检测输入、输出电流、电压、功率及用电量，测试时间可定为 0.5h。试验主回路接线如图 6.15-1 所示。

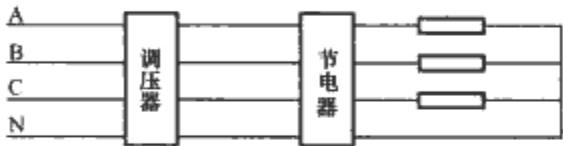


图 6.15-1 节电率检测

2) 同样负载，相同的输入电压，在非节电状态下节电装置检测电压、电流、功率、用电量，测试时间同样为 0.5h。

3) 节电率限值计算式为

$$\eta = [1 - (U_2/U_1)^2] \times 100\% - 2\%$$

式中： η 为节电率限定值； U_1 为输入电压； U_2 为输出电压。

4) 节电率计算式为

$$r = [(W_0 - W_1)/W_0] \times 100\%$$

式中： W_0 为无节电装置用电量，kW·h； W_1 为有节电装置时的用电量，kW·h； r 为节电率%。

5) 节电装置在节电状态的节电率应不小于节电率限值规定。

(2) 电子式节电装置（例如部分电机节电装置）：节电装置连接相应额定容量的电机（如电机容量不能与节电装置完全一致，双方协商解决）。

1) 节电装置在节电状态下，测量节电装置输入侧有功功率 P_{in} 。

2) 节电装置在额定、非节电状态运行下，测量节电装置输入侧有功功率 P 。

3) 节电率计算式为

$$r = [(P - P_{in})/P] \times 100\%$$

4) 节电率应在企业标准中给出。

第 16 章 电控配电用电缆桥架试验

1 简述

本章所述的试验方法、检测技术主要适用于工业与民用建筑室内外高低压输配电工程用的电缆桥架的试验,包括梯型桥架、槽型桥架(托盘式桥架)、组合式桥架、耐火电缆桥架、玻璃钢电缆桥架试验。包含了电控配电用电缆桥架的主要试验及检测项目。

2 试验依据和试验项目

2.1 试验依据

电控配电用电缆桥架的试验可以依据 JB/T 10216—2000《电控配电用电缆桥架》进行。

2.2 试验项目

型式试验项目包括:①外观检查;②机械负载试验;③支吊架负载试验;④撞击试验;⑤表面防护层人工气候试验——交变湿热试验;⑥表面防护层人工气候试验——盐雾试验;⑦表面防护层厚度试验;⑧表面防护层附着力试验;⑨表面防护层均匀性试验;⑩保护电路连续性试验;⑪防护等级试验;⑫耐火电缆桥架的耐火等级试验;⑬玻璃钢及其他非金属桥架的火焰蔓延试验;⑭玻璃钢及其他非金属桥架的耐水性试验;⑮玻璃钢及其他非金属桥架的耐化学腐蚀性试验;⑯玻璃钢及其他非金属桥架的耐工频电气强度性试验;⑰玻璃钢及其他非金属桥架的表面电阻率试验;⑱玻璃钢及其他非金属桥架的体积电阻率试验。

注:(1)金属桥架的检验项目为除⑫、⑬、⑭、⑮、⑯、⑰、⑱外的其他全部项目。

(2)玻璃钢及其他非金属桥架的检验项目为除⑦、⑧、⑨、⑩、⑫外的其他全部项目。

(3)耐火电缆桥架的检验项目为除⑬、⑭、⑮、⑯、⑰、⑱外的其他全部项目。

3 试验方法

3.1 外观检查

3.1.1 试验设备

试验设备:0~200mm 的游标卡尺、8m 的卷尺。

3.1.2 试验方法及要求

(1)桥架焊接表面均匀,不得有漏焊、裂纹、夹渣、烧穿、弧坑等缺陷。

(2)表面防护涂(镀)层技术要求符合表 6.16-4 的规定。

(3)附件的防腐处理应与桥架的主体结构相一致,紧固件的防腐处理符合表 6.16-4 的规定。

(4)各种类型的支、吊架其表面处理与托盘、梯架是否一致,可由制造厂和用户协商而定。

(5)玻璃钢及其他非金属桥架其外表面应平整、光滑、无划痕、缺料、裂纹、色调不一致,斑迹等缺陷。锯、切、冲口断面及连接孔断面不得有分层毛刺。

(6)电缆桥架的每单元都应有铭牌,铭牌可用铝制也可用不干胶,铭牌应给出:①制造厂名称或商标;②产品名称;③产品型号或规格;④出厂年月或出厂编号;⑤外壳防护等级。

(7)电缆桥架接地处应设置明显的接地标志,安装支架的位置处可设明显的标志符号。

(8)电缆桥架高、宽、板厚及连接螺钉应符合 JB/T 10216—2000 及制造厂的规定。

3.2 机械负载试验

桥架机械负载试验可依直线段接头部分负载为判断依据。当该试验通过后,不含接头的直线段及弯通机械负载试验可不做该项试验。

3.2.1 试验设备

试验设备:0~1000kg 砝码或钢条、0~300mm 高度游标卡尺。

3.2.2 试验方法

(1)样品要求:样品为直线段,不少于两件及必要的连接件。支吊架距离和额定均布负载值按表 6.16-1 的规定,直线段接头部分的负载试验按图 6.16-1 进行布置。

表 6.16-1 典型电缆桥架载荷表

材质	支吊架跨距 (m)	额定均布载荷(N/m)			挠度值 (不大于,mm)
		边高 100mm	边高 150mm	边高 200mm	
钢	2	1000	1850	3100	10
玻璃钢		550	1100	1750	
铝		800	1450	2450	6

注 其他支吊架跨距的额定均布载荷由制造厂在技术条件中给出。

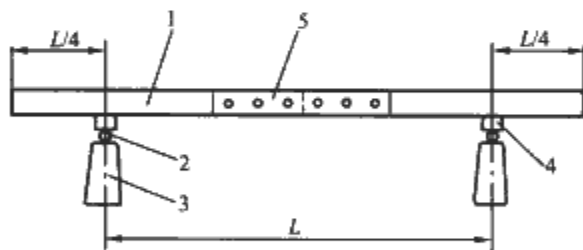


图 6.16-1 直线段接头部分负载试验布置形式

1—托盘梯架试件;2— $\phi 25$ 圆钢;3—钢支架底座;4—V形钢条(宽 30mm, 开有深 5mm、 120° 的 V 形槽);5—连接板;L—支吊架跨距(mm)

(2)试验负载要求:可用厚 3mm, 宽 30~50mm, 长度不大于 1m 的钢条或最大质量不超过 5kg 的砝码。

(3)加载:按表 6.16-1 给定的额定均布负载乘以 1.25 即为试验负载值,当支吊架大于 2m 时,按照制造厂产品技术条件提供的额定均布负载值。为了便于加载,可用厚 1mm, 长度不大于 1m 的钢板或网板放在支架跨距内横档上,两块钢板之间不能搭接,钢板质量应计入试验负载总质量。负载与试件侧边距离均为 10~15mm。

(4)桥架在承受额定均布载荷时,其相对挠度:钢制的不宜大于 1/200,铝制的不宜大于 1/300,玻璃钢的不宜大于 1/200,见表 6.16-1。

3.2.3 试验结果判定

测量位于跨距中部两个侧边的中心值取其平均挠度值符合表 6.16-1 的要求为合格,高度游标尺精度等级应为 0.1mm。

3.3 支吊架负载试验

3.3.1 试验设备

试验设备:0~1000kg 砝码或钢条、0~300mm 高度游标卡尺。

3.3.2 试验方法及要求

(1) 试品要求:制造厂应按不同的支吊架型式提供(至少两种或两种以上)的组装形式,试验布置方法见图 6.16-2。

(2) 试验负载:试验负载按下式确定

$$Q = L(K_0 q_z + G) \tag{6.16-1}$$

式中:Q 为试验负载,kg;K₀ 为安全系数,取 K₀ = 1.7;L 为支、吊架相邻两侧等跨布置时的跨距,m;q_z 为每层桥架的额定均布负载,kg/m;G 为托盘、梯架及盖板、附件的自重,kg/m。

(3) 加载:

1) 按托盘、梯架的两侧边在托臂上的位置吊挂负载,盛装负载材料的容器、吊具的质量应计入负载总质量。

2) 当立柱或吊杆支承多层托臂时,应分次加载,各层托臂应同时承受各自的试验负载的整体试验。

3.3.3 试验结果判定

(1) 当试验荷载按式(6.16-1)加至额定值时,测量图 6.16-2 中位移 a、b,钢制吊架的横担或侧壁固定的托臂在承受额定负载时的最大挠度值与其支吊架本身长度之比不宜大于 1/100。托臂为铝型材时,不宜大于 1/150。

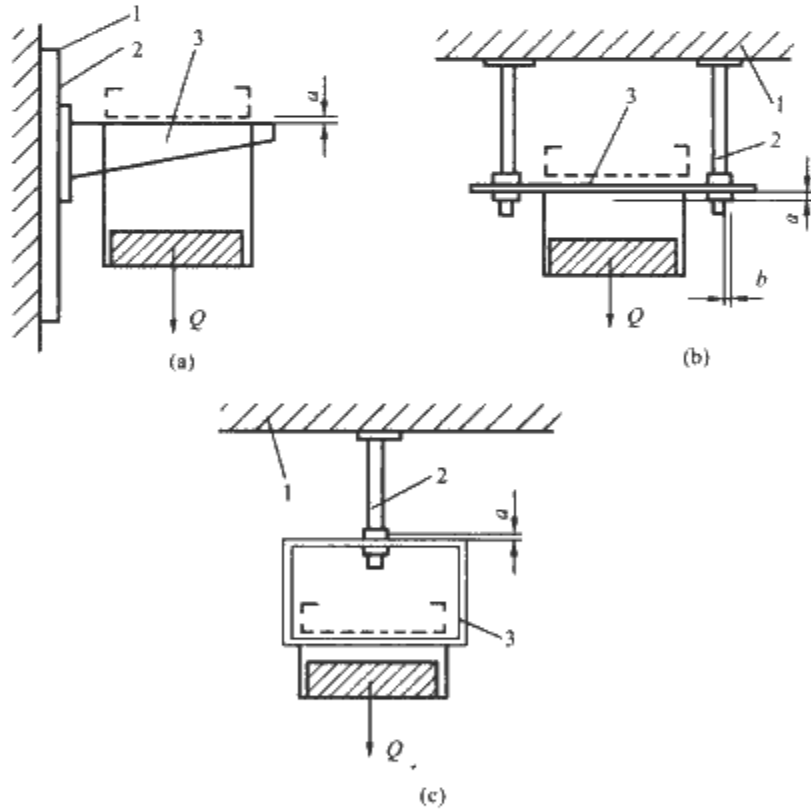


图 6.16-2 典型试验支架固定体及受试支吊架定位方式

1—实验支架固定体;2—支架或立柱;3—托臂;
a、b—位移;Q—试验负载

(2) 试验完毕,卸下试验负载,支吊架不应有明显的变形。

(3) 检查焊口或螺栓连接处不应有裂纹、变形损坏,卡式托臂不应有下滑。

3.4 撞击试验

3.4.1 试验设备

试验设备:5kg 摆锤、+70℃ 高温试验箱、-20℃ 低温

试验箱。

3.4.2 试验方法

(1) 试品要求:玻璃钢桥架及其他非金属试品各自为 3 件,长度为 250mm±5mm。钢制桥架长度不限。

(2) 撞击试验:金属桥架可在常温下进行,玻璃钢或其他非金属材料制成的桥架试验前应进行 240h,60℃±2℃ 的老化过程后,将试品放入温度为-20℃±2℃ 恒温冰箱中,2h 后,将试品依次取出,在 10s±1s 的时间内完成撞击试验。三个试品分别做底部及两个侧边的撞击试验,撞击次数为各 1 次,撞击的部位分别为底部及两侧边的中部。撞击严酷等级见表 6.16-2。

表 6.16-2 撞击严酷等级

撞击能量	等效质量(kg)	撞击元件锤头	标准跌落高度	
(J)	±5%	R(r)(mm)	材料	±1%
10	5	50	钢	500

3.4.3 试验结果判定

撞击试验后未出现影响安全使用的变形和裂纹为合格。

3.5 人工气候防护试验—交变湿热试验

应按表 6.16-3 规定的试验项目、试验周期进行试验。防护类型试验可按用户要求选择,生产厂家必须做普通型(J)防护类型试验。

表 6.16-3 人工气候防护试验项目及周期

试验项目	试验方法	各种类型的试验周期				
		户内				户外
		J②	TH②	F1②	F2②	W②
交变湿热试验①	按 GB/T 2423.4 的规定	1d	2d	—	—	2d
盐雾试验	按 GB/T 2423.17 的规定	48h	96h	96h	240h	96h

① 交变湿热试验采用高温阶段为 55℃±2℃ 条件,降温阶段的相对湿度下限值为 85%。

② 防护类型代号:J 普通型;TH 湿热型;F1 防中等腐蚀型;F2 防强腐蚀型;W 户外型;N1-N3 耐火型。

3.5.1 试验设备

试验设备:温度 0~70℃,相对湿度 0~100% 高温湿热试验箱。

3.5.2 试验方法

根据生产厂提出的防护类型按表 6.16-3 进行交变湿热试验。

3.5.3 试验结果判定

经交变湿热试验后镀层允许有个别的腐蚀点,产生腐蚀点的面积≤50%,涂层没有起泡现象为合格。

3.6 人工气候防护试验—盐雾试验

3.6.1 试验设备

试验设备为盐雾箱。

3.6.2 试验方法

(1) 根据生产厂提出的防护类型按表 6.16-3 进行盐雾试验。

(2) 配置(5±0.1)%浓度的盐溶液;调整盐溶液的 pH 值为 6.7~7.2;盐雾箱内的温度设定在(35±2)℃,连续喷雾时间按表 6.16-3 选取。

3.6.3 试验结果判定

试验结束后,用流动水轻轻洗去试验样品表面盐沉积

用四氯化碳、苯等除去表面油污，流水冲净后，以净布擦干后再浸入 2% 的硫酸溶液中（2ml 密度 1.84g/cm^3 的硫酸以 98ml 水稀释）15s 后以流水冲净，再用净布擦干，将试样两端露出基体金属处涂以油漆或石蜡。

2) 将准备好的试样，置于 $(18 \pm 2)^\circ\text{C}$ 硫酸铜的溶液中浸泡 1min，此时不许搅动溶液，亦不得移动试样，1min 后立即取出试样，以流水冲洗，并用软毛刷除掉黑色沉淀物，特别要刷掉孔洞凹处沉淀物，然后用净布擦干立即进行下一次浸蚀。

(3) 试验结果判定：浸蚀 4 次不露出金属基体为合格。

3.9.2 电镀锌、阳极氧化电缆桥架

(1) 试验设备：镀锌层厚度测试仪。

(2) 试验方法：用镀锌层厚度测试仪测其表面最薄镀层厚度。

(3) 试验结果判定：其表面最薄镀层厚度，不得低于允许厚度的 80%，且不应超过 20% 的测试点为合格。

3.9.3 静电喷涂、喷漆、防火涂料电缆桥架

(1) 试验设备：目测。

(2) 试验方法：目测涂层表面层次感。

(3) 试验结果判定：涂层表面没有明显的层次感为合格。

3.10 保护电路连续性试验

3.10.1 试验设备

试验设备为 AC25A、电阻 $0 \sim 100\text{m}\Omega$ 电阻测量仪。

3.10.2 试验方法

(1) 试品要求：试品应包括两个直线段和与之配套的连接板及连接螺栓等，当防护层为非导电性涂层时，还应包括一组跨接导线。用相适应的除油剂将被试样品清洗干净，不得带有油污，并安装好部件。

(2) 试验方法：样品通以 $25\text{A} \pm 0.1\text{A}$ 的交流电，频率为 $50 \sim 60\text{Hz}$ ，由一个空载电压不超过 12V 的电源提供。按图 6.16-3 的布置测量距连接板各端 $50\text{mm} \pm 20\text{mm}$ 处 A、B 之间的电阻，然后再测无接点处 CD 之间的电阻。

3.10.3 试验结果判定

根据电流和电压降计算阻抗值，其中跨接点处小于等于 $50\text{m}\Omega$ ，无接点处小于 $5\text{m}\Omega/\text{m}$ 为合格。

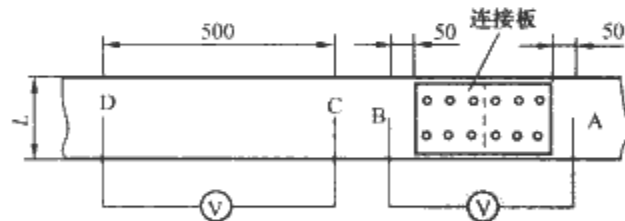


图 6.16-3 电气连续性布置图
L—托盘、梯架的边高

3.11 防护等级试验

3.11.1 试验设备

试验设备是直径为 1mm、2.5mm 钢试棒，淋水装置。

3.11.2 试验方法

试验方法见本篇第 2 章 7 防护等级验证。

3.11.3 试验结果判定

(1) 无孔托盘（带盖）防护等级户内 IP30，户外 IP33 为合格。

(2) 耐火电缆桥架防护等级户内 IP40，户外 IP44 为合格。

3.12 耐火电缆桥架的耐火等级试验

3.12.1 试验设备

试验设备为耐火试验炉、炉温、压力测试仪。

3.12.2 试验方法

(1) 试品要求：至少有两直线段耐火桥架，其受火总长度应不小于 4m，外形尺寸最大为（宽×高）500mm×500mm，试件总长度 5.4~6.0m。

(2) 有足够的与实际相符的连接件。

(3) 支撑采用柱支撑，柱子的高度应使桥架满足四面受火的要求，桥架顶面与炉顶距离不小于 150mm，柱子的截面尺寸要由柱子实际承受的额定负载计算而得。

(4) 要求电缆：

1) 动力电缆：1 根额定电压 600/1000V 聚氯乙烯绝缘电缆，聚氯乙烯护套电力电缆 $\text{VV}3 \times 4 + 1 \times 2.5$ ；1 根额定电压 600/1000V 聚氯乙烯绝缘，聚氯乙烯护套电力电缆 $\text{VV}3 \times 50 + 1 \times 25$ 。

2) 控制电缆：1 根额定电压 300/500V 聚氯乙烯绝缘，聚氯乙烯护套总屏蔽电子计算机用电缆 $\text{DJYVP}1 \times 2 \times 1.5$ ；1 根额定电压 450/750V 聚氯乙烯绝缘，聚氯乙烯护套控制电缆 $\text{KVV}2 \times 1.5$ 。

(5) 试件安装：

1) 桥架炉内安装见图 6.16-4。

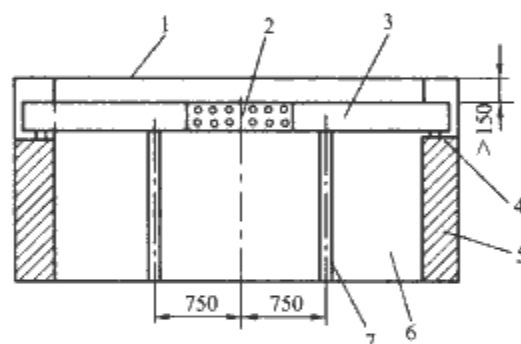


图 6.16-4 桥架炉内安装简图

1—炉顶；2—试件接头；3—槽盒；4—支撑点；
5—炉壁；6—炉膛；7—支撑（柱）

2) 电缆的敷设见图 6.16-5。

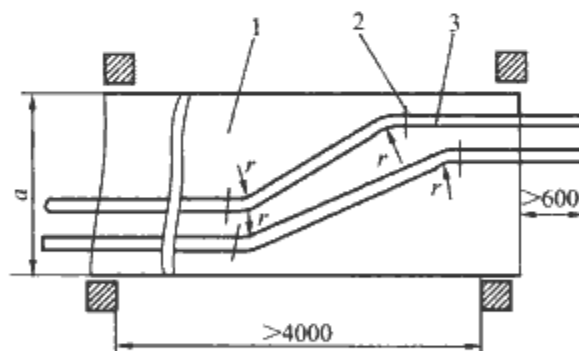


图 6.16-5 耐火电缆桥架内电缆敷设示意图

1—桥架；2—电缆固定环；3—试验电缆；
r—电缆最小弯曲半径（动力缆 $r=4D$ ，
控制电缆 $r=10D$ ，D 为电缆的外径）

3) 电缆接线见图 6.16-6。

4) 电缆接线见图 6.16-7。

(6) 试验方法：将电缆通电，并调整变压器至电缆的额定电压。检查加热炉内热电偶记录下来的初始温度，当接近试件中心热电偶的温度达到 50°C 时，所有的测量仪表开始工作，试验开始。试验期间应按以下要求进行观察和测量：

1) 每隔 1min 测量并记录试验炉内温度。

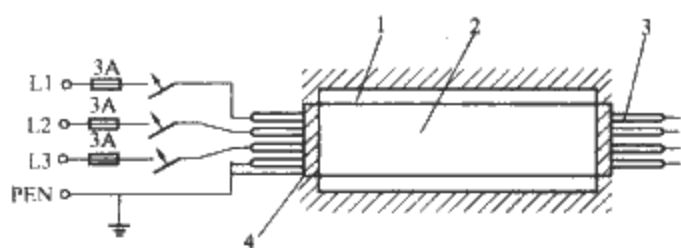


图 6.16-6 动力电缆耐试验接线
1—加热炉；2—桥架；3—试验电缆；4—支撑点

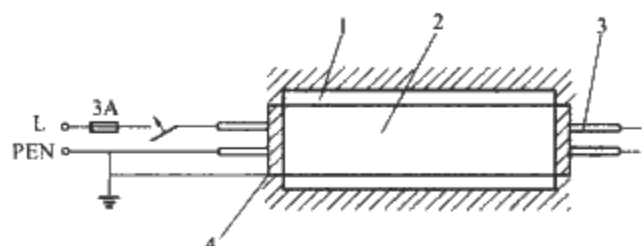


图 6.16-7 控制电缆耐试验接线
1—加热炉；2—桥架；3—试验电缆；4—支撑点

2) 每隔 2min 测量并记录试验炉内压力温度。

3) 耐火试验开始后，应随时观察 3A 熔断器情况，并记录下 3A 熔断器熔断的时间。

3.12.3 试验结果判定

桥架内电缆漏电流达到 3A 时，即表明该桥架已不能维持其内部电缆继续工作，丧失耐火能力，此时即为桥架的维持工作时间。维持工作时间应至少达到耐火等级 N1（维持工作时间 30min）的规定。

3.13 玻璃钢及其他非金属桥架的火焰蔓延试验

3.13.1 试验设备

试验设备为火焰蔓延试验仪。

3.13.2 试验方法

将样品放在长方形的金属壳体内，夹紧样品的两端，使其在施加火焰的条件下可以放进或放出，壳体内部应覆上一块松木板，厚度约 10mm，外边用强度为 12~30g/m² 的单层棉纸包住，样品长度为 675mm±10mm。样品应经受 60s±2s 的火焰燃烧，试验方法及试验介质见 JB/T 10216—2000 表 14。

3.13.3 试验结果判定

样品没有着火，移开试验火焰 30s 内熄灭，棉纸没有燃烧或木板没烤焦，距上夹持件底边 50mm 内和距下夹持件顶边 50mm 内没有明显的着火和烤焦的痕迹为合格。

3.14 玻璃钢及其他非金属桥架的耐水性试验

3.14.1 试验设备

试验设备为拉力机。

3.14.2 试验方法

(1) 试验介质：23℃±2℃的蒸馏水。

(2) 试验周期：14 天。

3.14.3 试验结果判定

弯曲强度大于 120MPa 为合格。

3.15 玻璃钢及其他非金属桥架的耐化学腐蚀性试验

3.15.1 试验设备

试验设备为拉力机。

3.15.2 试验方法

(1) 试验介质：硫酸 30%，盐酸 5%，丙酮、氨水等加配蒸馏水，必须两种介质以上。

(2) 试验周期：14 天。

3.15.3 试验结果判定

弯曲强度大于 120MPa 为合格。

3.16 玻璃钢及其他非金属桥架的耐工频电气强度试验

3.16.1 试验设备

试验设备为峰值耐压试验装置。

3.16.2 试验方法

试验介质：电极黄铜。

3.16.3 试验结果判定

施加 16kV 峰值电压无击穿闪络为合格。

3.17 玻璃钢及其他非金属桥架的表面电阻率试验

3.17.1 试验设备

试验设备为表面、体积电阻率测试仪。

3.17.2 试验方法

(1) 试验介质：电极。

(2) 试验周期：电化时间为 1min。

3.17.3 试验结果判定

表面电阻大于或等于 10⁸Ω 为合格。

3.18 玻璃钢及其他非金属桥架的体积电阻率试验

3.18.1 试验设备

试验设备为表面、体积电阻率测试仪。

3.18.2 试验方法

(1) 试验介质：电极。

(2) 试验周期：电化时间为 1min。

3.18.3 试验结果判定

体积电阻大于或等于 10⁷Ω 为合格。

3.19 外观检查

见本章 3.1。

3.20 防护层厚度检查

见本章 3.7~3.9。

3.21 保护电路连续性试验

见本章 3.10。

第 17 章 低压成套辅助设备试验

1 简述

本章所述的试验方法、检测技术主要是用于低压成套辅助设备试验，包括接线端子排、低压抽出式成套开关设备和控制设备辅助电路用接插件、主电路用接插件、母线架、导线用铜压接端头等低压成套辅助设备试验。包含了目前低压成套辅助设备的主要试验及检测项目。

2 接线端子排试验

2.1 适用范围

接线端子排主要用于工业或类似用途的安装在支架上为铜导线提供电气连接的装置。接线端子块的型式有夹紧件为螺纹型和为非螺纹型两种。本试验适用于额定电压交流不超过 1000V，频率至 1000Hz 或直流不超过 1500V 电路中，用于连接截面积为 0.2~300mm² 经过或未经过特殊加工的圆铜导线的接线端子排。

也适用于 GB/T 14048.8—2006 规定的保护导体接线端子排，用于铜导体和安装支架之间的电气和机械连接，具有 PE 保护功能的接线端子排连接导线不大于 120mm²，具有 PEN 保护功能的接线端子排连接导线大于或等于 10mm²。它与 GB/T 14048.7—2006 规定的接线端子排通常连接在一起使用。

需要在导线上加装特殊装置的接线端子排，如快速连接端头、绕接连接、借助棱边或尖端穿刺绝缘来实现与导线直接接触的接线端子排，可用本章作为指南。

注意：本章出现的接线端子块具有一个或多个彼此绝缘的接线端子组件，且预定装在支架上的绝缘部件。接线端子排是由多个接线端子块组合而成。

2.2 试验环境条件要求

试验应在周围空气温度 (20±5)℃ 环境中、污染等级不低于 3 级、安装类别不低于Ⅲ类等条件下进行。

2.3 试验依据及试验项目

2.3.1 试验依据

(1) GB/T 14048.7—2006 《低压开关设备和控制设备第 7-1 部分：辅助器件 铜导体的接线端子排》。

(2) GB/T 14048.8—2006 《低压开关设备和控制设备第 7-2 部分：辅助器件 铜导体的保护导体接线端子排》。

2.3.2 试验项目

接线端子的识别、标志及外观尺寸检查、电气间隙和爬点距离测量、安装在支架上试验、夹紧件的机械强度试验、电压降测量、弯曲试验、拉出试验、耐湿热性能的试验、介电性能试验、温升试验、额定截面积和额定连接能力试验、额定截面积试验、短时耐受电流试验、非螺纹型接线端子排的老化试验、耐火和非正常热试验、验证 EMC 性能。

2.4 试验方法

2.4.1 接线端子的识别、标志及外观尺寸检查

(1) 测量工具：目测，游标卡尺（精度 0.02 级）。

(2) 试验方法及要求：

1) 外观检查：零部件表面粗糙度、镀层外观质量及绝缘件外观质量应符合图样及设计文件的要求。

2) 接线端子的识别和标志检查：接线端子块应对每个夹紧件或构成电路部件的接线端子组件提供识别标志或编码，或者至少要有标上这些内容的部位。对于部分绝缘的保护导体，接线端子块必须用绿黄双色标志，接线端子块上需标明便于识别的制造商名称或商标、型号等，标志字迹应清晰，经久耐用。对于其他有关数据可在附加资料中体现，如执行标准、额定截面积、额定绝缘电压、额定连接能力等。

3) 尺寸检查：用游标卡尺测量接线端子排的外形尺寸和安装尺寸，应符合产品图样的要求。

2.4.2 电气间隙和爬电距离测量

(1) 测量工具：游标卡尺（精度 0.02 级）。

(2) 试验方法及要求：用游标卡尺测量两个相邻的接线端子块之间和在一个接线端子块与安装此接线端子块的金属支架之间的最小电气间隙和爬电距离。具体方法及要求见第 2 章，对于保护导体接线端子排不适用。

2.4.3 安装在支架上试验

(1) 试验设备：扭力螺钉旋具或扭力扳手、钢插件。

(2) 试验方法及要求：将 5 个接线端子块安装在合适的支架上，试验在 5 个接线端子块的中心端子块位置的两个夹紧件上进行。按表 6.17-2 规定的拧紧力矩或为制造商规定的力矩值的 110%，将长度为 150mm 钢插件依次固定在每个夹紧件中；在距夹紧件中心点 100mm 处，对钢插件施加一个与表 6.17-1 数值相符的垂直方向的力。

试验过程中，接线端子块不得从安装轨上或支架上松脱，也不允许有任何其他损坏为合格。

表 6.17-1 安装试验参数

额定截面积 (mm ²)	力 (N)	插件直径 (mm)
0.2~4.0	1	1.0
6.0~16.0	5	2.8
25.0~70.0	10	5.7
95.0~185.0	15	12.8
240.0~300.0	20	20.5

2.4.4 夹紧件的机械强度试验

(1) 试验设备：扭力螺钉旋具或扭力扳手。

(2) 试验方法及要求：

1) 将五个接线端子块安装在合适的支架上，试验在五个接线端子块的中心端子块位置的两个夹紧件上进行。分别采用额定截面积的硬导线、最小截面积的软导线进行试验。对于螺纹型的接线端子排，拧紧力矩应按表 6.17-2 规定值或为制造商规定力矩值的 110%来进行。

用额定截面积的硬导线在接线端子排上各拆装五次，对于保护导体接线端子排还应从其支架上安装、拆卸各五次。

2) 如果夹紧件具有六角头，也有可用螺钉旋具拧紧的螺

钉时，表 6.17-2 中第Ⅱ和第Ⅲ列的值相同，只需进行螺钉旋具拧紧试验。如果不相同需进行 2 次试验，首先按表中第Ⅲ列规定力矩施加至六角头螺钉上来进行，然后在另一组试品上按表中第Ⅱ列规定力矩用螺钉旋具拧紧螺钉进行。每次拧紧的螺钉或螺母松掉后，再采用新的导线进行下一次拧紧试验。

(3) 试验结果判定：

- 1) 试验过程中紧固件和接线端子都不能松脱，试验后没有影响继续使用的损坏，如螺纹滑牙，螺钉头的槽、螺纹、垫圈的损坏等。
- 2) 对于接线端子排，试验前所测电压降不超过 3.2mV，试验后测量电压降不超过试验前测量值的 1.5 倍。
- 3) 对于保护导体接线端子排，试验前所测电压降 U_{cc} 不超过 3.2mV，电压降 U_{cs} 不超过 6.4mV，试验后电压降 U_{cc} 和电压降 U_{cs} 的值分别不超过 4.8mV 和 9.6mV，或测量值不超过试验前测量值的 1.5 倍，二者之间取低值。

表 6.17-2 验证螺纹型夹紧件机械强度的拧紧力矩

螺纹直径 (mm)		拧紧力矩 (N·m)		
米制标准值	直径范围 ϕ	I	II	III
1.6	$\phi \leq 1.6$	0.05	0.1	0.1
2.0	$1.6 < \phi \leq 2.0$	0.1	0.2	0.2
2.5	$2.0 < \phi \leq 2.8$	0.2	0.4	0.4
3.0	$2.8 < \phi \leq 3.0$	0.25	0.5	0.5
	$3.0 < \phi \leq 3.2$	0.3	0.6	0.6
3.5	$3.2 < \phi \leq 3.6$	0.4	0.8	0.8
4.0	$3.6 < \phi \leq 4.1$	0.7	1.2	1.2
4.5	$4.1 < \phi \leq 4.7$	0.8	1.8	1.8
5	$4.7 < \phi \leq 5.3$	0.8	2.0	2.0
6	$5.3 < \phi \leq 6.0$	1.2	2.5	3.0
8	$6 < \phi \leq 8$	2.5	3.5	6.0
10	$8 < \phi \leq 10$	—	4.0	10.0
12	$10 < \phi \leq 12$	—	—	14.0
14	$12 < \phi \leq 15$	—	—	19.0
16	$15 < \phi \leq 20$	—	—	25.0
20	$20 < \phi \leq 24$	—	—	36.0
24	$\phi > 24$	—	—	50.0

注 第Ⅰ列：适用于拧紧时不突出孔外的无头螺钉和不能用刀口宽度大于螺钉顶部直径的螺钉旋具拧紧的其他螺钉。
第Ⅱ列：适用于可用螺钉旋具拧紧的螺钉和螺母。
第Ⅲ列：适用于不可用螺钉旋具拧紧的螺钉和螺母。

2.4.5 电压降测量

- (1) 试验设备：恒流电流源，直流数字电压表。
 - (2) 试验方法及要求：
 - 1) 在下列情况下验证电压降：在夹紧件机械强度试验前后、在升温试验的前后、在短时耐受电流试验的前后、在老化试验前后及其期间进行。
 - 2) 对接线端子排按图 6.17-1 所示连接，对保护导体接线端子排按图 6.17-2 所示连接，试验时应按表 6.17-2 规定的拧紧力矩值固定导线，连接导线规格按各项试验要求进行连接。
 - 3) 测量电压降时采用直流电流法，试验电流按表 6.17-3 规定的电流值的 0.1 倍选取。
- 电压降测量值应满足机械强度、温升、短时耐受电流及

老化性能试验的要求为合格。

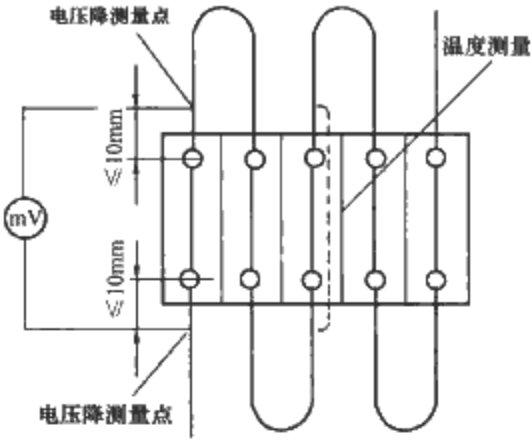


图 6.17-1 电压降、温升测量示意图

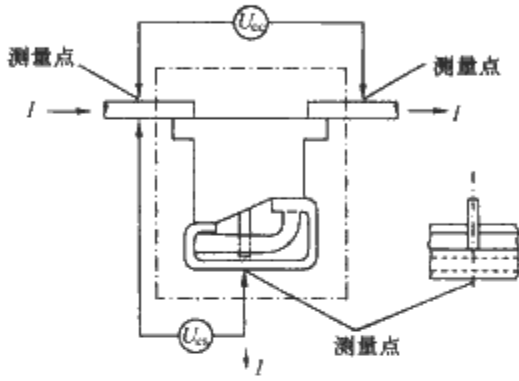


图 6.17-2 电压降测量示意图

表 6.17-3 对于标准尺寸导线进行温升、老化 and 电压降试验时的试验电流值

额定截面积 (mm ²)	0.2	0.34	0.5	0.75	1.0	1.5	2.5	4.0	6.0	10.0	16.0
试验电流 (A)	4	5	6	9	13.5	17.5	24	32	41	57	76
额定截面积 (mm ²)	25.0	35.0	50.0	70.0	95.0	120	150	185	240	300	
试验电流 (A)	101	125	150	192	232	269	309	353	415	520	

2.4.6 弯曲试验

- (1) 试验设备：拉力扭曲试验机。
 - (2) 试验方法及要求：用于连接非预制圆铜导线的接线端子。
 - 1) 试验在一个接线端子块的两个夹紧件上进行，试验时按表 6.17-2 规定的力矩值或制造商规定的较大力矩值固定导线，试验参数按表 6.17-4 规定选取。
 - 2) 采用制造商规定的导线的种类和根数进行如下试验：
 - a. 用规定的最小截面积的不同类型的导线（只连接一根导线）。
 - b. 用规定的额定截面积的不同类型的导线（只连接一根导线）。
 - c. 如果大于额定截面积，用最大连接截面积的导线类型（只连接一根导线）。
 - d. 用同时可连接的最小截面积导线的最多根数和不同类型的导线。
 - e. 用同时可连接的最大截面积导线的最多根数和不同类型的导线。
 - f. 用同时可连接的最小和最大截面积导线的最多根数和不同类型的导线。
- 上述试验过程中，导线既不脱出接线端子块，又不在夹

紧件处折断，则认为合格。

表 6.17-4 弯曲、拉出试验参数

导线截面积 (mm ²)	轴套孔直径 (mm)	高度 H (mm)	质量 m (kg)	拉力 (N)
0.2	6.4	260	0.3	10
0.34	6.4	260	0.3	15
0.5	6.4	260	0.3	20
0.75	6.4	260	0.4	30
1.0	6.4	260	0.4	35
1.5	6.4	260	0.4	40
2.5	9.5	279	0.7	50
4.0	9.5	279	0.9	60
6.0	9.5	279	1.4	80
10.0	9.5	279	2.0	90
16.0	12.7	298	2.9	100
25.0	12.7	298	4.5	135
35.0	14.3	318	6.8	190
50.0	15.9	343	9.5	236
70.0	19.1	368	10.4	285
95.0	19.1	368	14	351
120.0	22.2	406	14	427
150.0	22.2	406	15	427
185.0	25.4	432	16.8	503
240.0	28.6	464	20	578
300.0	28.6	464	22.7	578

注 如果规定的衬套孔直径不足以容纳包扎导线，则可以用一个较大孔径的衬套。

2.4.7 拉出试验

(1) 试验设备：拉力试验机。

(2) 试验方法及要求：弯曲试验后紧固被试导线的螺钉不应再次拧紧，按表 6.17-4 规定的拉力作用到弯曲试验后的导线上，拉力应平稳持续地作用 1min，且不允许突然施加。

试验过程中，导线既不脱出接线端子块，又不在夹紧件处折断，则认为合格。

2.4.8 耐湿热性能试验

(1) 试验设备：交变湿热箱。

(2) 试验方法及要求：

1) 将相邻的 5 个接线端子块安装在金属支架上并接入导线，在室温条件下放置不少于 4h，然后放入交变湿热箱内。

2) 试验采用交变湿热的方法，试验时温度、湿度在每个周期中交替作“高温高湿和低温高湿”的变化。试验严酷等级优先选用高温温度 40℃，周期数为 6 昼夜。

3) 交变湿热试验按图 6.17-3 的规定，使工作空间内的温度在 24h 内循环变化，降温时相对湿度选用不低于 95%。在试验结束前（低温高湿阶段）1h 或 2h 中验证试验样品的工频耐压，试验电压值按 2U_N，不小于 1000V 进行 1min 工频耐压试验。

(3) 试验结果判定：试验结束前 1~2h 内进行工频耐压试验，应无绝缘击穿和表面闪络现象，其外观无影响继续使用的变化为合格。

2.4.9 介电性能试验

(1) 固体绝缘的工频耐压试验：

1) 试验设备：耐压测试仪。

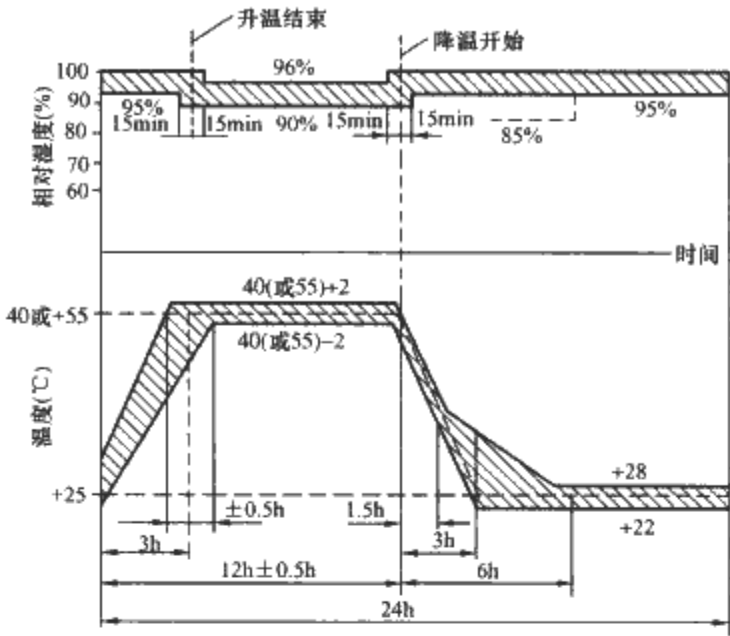


图 6.17-3 交变湿热试验周期

2) 试验方法及要求：

a. 试验电压的波形为正弦波，频率在 45~65Hz 之间，试验所用的高压变压器在输出电压调整到相应的试验电压后，将输出端子短路时，其输出电流至少为 0.2A。

b. 工频耐压试验在下列规定条件下进行：

a) 接线端子排采用制造商提供的最不适宜的导线类型和导线截面积连接。

b) 导线末端应剥去制造商规定的一段长度。

c) 在制造商已规定可能使用不同金属支架的情况下，应选用最不适宜的支架。

c. 试验电压按表 6.17-5 规定进行，电压测量的不准确度不应超过规定值的±3%。

d. 接线端子排的工频耐压试验：将相邻的 5 个接线端子块安装在金属支架上并接入导线，首先在相邻接线端子块之间施加电压 1min，然后在全部连接在一起的接线端子排与安装支架之间施加电压 1min。

e. 保护导体接线端子排的工频耐压试验：将 3 个保护导体接线端子块与两个接线端子块按图 6.17-4 所示固定在金属支架上并接入导线，试验电压施加在保护导体接线端子排和接线端子排之间，施加 1min。

上述试验过程中没有击穿性放电为合格。

(2) 冲击耐受电压试验：

1) 试验设备：标准雷电冲击电压发生器。

2) 试验方法及要求：冲击耐受电压按表 6.17-6 规定值进行，施加部位与工频耐压试验相同，试验时每一极性各施加 5 次，最小时间间隔为 1s，具体方法及要求见第 2 章。

上述试验过程中没有击穿性放电为合格。

表 6.17-5 试验电压值

额定绝缘电压 U _i (V)	介电试验电压 (交流方均根值) (V)
U _i ≤ 60	1000
60 < U _i ≤ 300	1500
300 < U _i ≤ 690	1890
690 < U _i ≤ 800	2000
800 < U _i ≤ 1000	2200
1000 < U _i ≤ 1500 ^①	—

① 仅指直流。

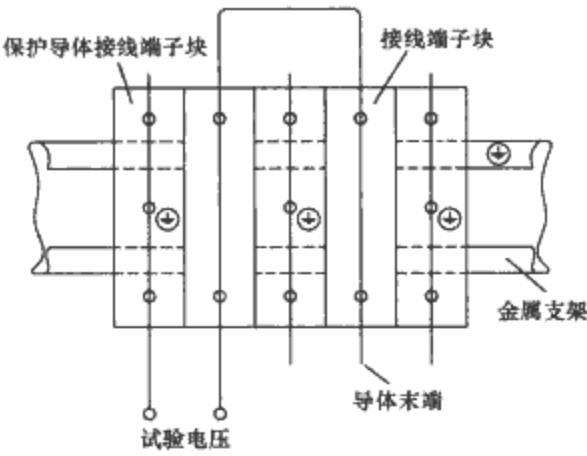


图 6.17-4 保护导体接线端子排介电试验

表 6.17-6 冲击耐受电压

额定冲击 耐受电压 U_{imp} (kV)	试验电压和相应的海拔				
	$U_{1.2/50}$ (kV)				
	海平面	200m	500m	1000m	2000m
0.33	0.36	0.35	0.35	0.34	0.33
0.5	0.55	0.54	0.53	0.52	0.5
0.8	0.91	0.9	0.9	0.85	0.8
1.5	1.75	1.7	1.7	1.6	1.5
2.5	2.95	2.8	2.8	2.7	2.5
4	4.8	4.8	4.7	4.4	4
6	7.3	7.2	7	6.7	6
8	9.8	9.6	9.3	9	8
12	14.8	14.5	14	13.3	12

注 本表采用了表 6.2-13 均匀电场、情况 B 的特性。

2.4.10 温升试验

- (1) 试验设备：低压大电流设备，温度测试仪。
(2) 试验方法及要求：

1) 对于接线端子排温升试验按图 6.17-1 所示连接；对于具有 PEN 功能保护导体接线端子排，温升试验仅适用于额定截面积不小于 10mm^2 的连接端子，温升试验需提供两种不同的试验组别，第一组将 5 片相互绝缘的保护导体接线端子相邻排列，不用支架安装，如图 6.17-5 所示，第二组将 5 片保护导体接线端子相邻安装在支架（支架不允许采用钢制材料）上，如图 6.17-6 所示。

2) 端子排与导线、安装支架连接应按表 6.17-2 规定的力矩值或制造商规定的较大力矩值固定。对接入端子的导线：额定截面积不大于 10mm^2 的，每根最短长度为 1m；额定截面积较大的（大于 10mm^2 ），每根最短长度为 2m。若导线额定截面积小于 10mm^2 ，采用单根硬导线；若额定截面积等于或大于 10mm^2 ，则采用多股硬导线。

3) 用单相交流电流进行本试验，试验电流按表 6.17-3 规定值选取。温升试验达到稳定温度后，连续测温 3 次，每次间隔 5min。当任意两次所测温度的变化小于 1K 时，则认为达到了稳定温度。

4) 温升试验前先测量电压降。试验结束后，接线端子排不作任何变动，待冷却到周围空气温度后测量电压降。

(3) 试验结果判定：

- 1) 接线端子排的中央任何部位温升不超过 45K。
2) 对于接线端子排，试验前所测电压降不超过 3.2mV，试验后测量电压降不超过试验前测量值的 1.5 倍。

3) 对于保护导体接线端子排，试验前所测电压降 U_{cc} 不超过 3.2mV，电压降 U_{cs} 不超过 6.4mV，试验后电压降 U_{cc}

和电压降 U_{cs} 的值分别不超过 4.8mV 和 9.6mV，或测量值不超过试验前测量值的 1.5 倍，二者之间取其低值。

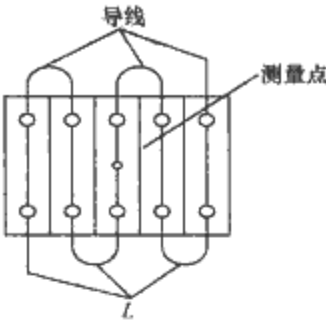


图 6.17-5 第一组温升示意图

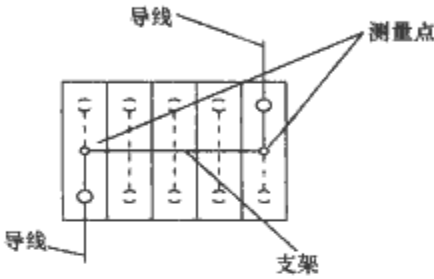


图 6.17-6 第二组温升示意图

2.4.11 额定截面积和额定连接能力验证

(1) 试验方法及要求：试验在一个接线端子块的每个夹紧件上进行。对于具有额定连接能力至 35mm^2 的端子块，一根比其小两个截面积等级的导线应能无阻碍地插入并连接至敞开的夹紧件中。

(2) 试验结果判定：额定截面积和额定连接能力应满足表 6.17-7 的规定。

表 6.17-7 接线端子排的额定截面积与额定连接能力之间的关系

额定截面积 (mm^2)	额定连接能力 (mm^2)	额定截面积 (mm^2)	额定连接能力 (mm^2)	额定截面积 (mm^2)	额定连接能力 (mm^2)
0.2	0.2	2.5	1~1.5~2.5	35	16~25~35
0.34	0.2~0.34	4	1.5~2.5~4	50	25~35~50
0.5	0.2~0.34~0.5	6	2.5~4~6	70	35~50~70
0.75	0.34~0.5~0.75	10	4~6~10	95	50~70~95
1	0.5~0.75~1	16	6~10~16	120	70~90~120
1.5	0.75~1~1.5	25	10~16~25		

2.4.12 额定截面积试验

(1) 试验工具：钢制模拟量规。

(2) 试验方法及要求：本试验适用于非预制导线（包括管状端头压接的导线）接入的接线端子。用标准规定的模拟量规进行试验，量规的测量截面积能穿进接线端子的孔中，在量规的重力作用下插入接线端子的底部。

如果导线并非标准所给出的截面积，可用适当截面积的预制导线作为模拟量规，插入力不大于 5N。

2.4.13 短时耐受电流试验

(1) 试验设备：短路试验系统。

(2) 试验方法及要求：此项试验目的是验证接线端子块耐受热冲击能力。

1) 本试验在一个接线端子块上完成，按制造商说明书要求安装，采用具有额定截面积的导线进行连接。若导线额定截面积小于 10mm^2 ，采用单根硬导线；若额定截面积等于或大于 10mm^2 ，则采用多股硬导线。端子与导线和与支

架连接应按表 6.17-2 规定的力矩值或制造商规定的较大力矩值固定。

2) 接线端子块应承受 $120\text{A}/\text{mm}^2$ 短时耐受电流值 1s , 对于保护导体接线端子块应承受 $120\text{A}/\text{mm}^2$ 短时耐受电流 1s , 共进行 3 次。试验电流按图 6.17-7 所示, 电流先通过路径 1-1, 再通过路径 2-2, 两次电流浪涌之间允许有至少 6min 的间隔。

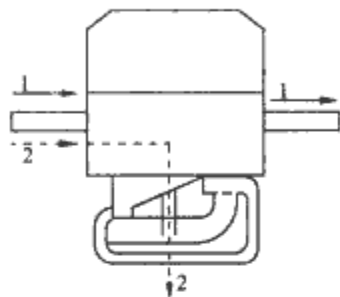


图 6.17-7 保护导体接线端子块
短时耐受电流试验

3) 试验前先测量电压降。试验结束后, 接线端子块不作任何变动, 待冷却到周围空气温度后测量电压降。

(3) 试验结果判定:

1) 试验结束后, 接线端子块的任何零部件均没有出现可能影响其继续使用的损坏。

2) 对于接线端子排, 试验前所测电压降不超过 3.2mV , 试验后测量电压降不超过试验前测量值的 1.5 倍。

3) 对于保护导体接线端子排, 试验前所测电压降 U_{cc} 不超过 3.2mV , 电压降 U_{cs} 不超过 6.4mV , 试验后电压降 U_{cc} 和电压降 U_{cs} 的值分别不超过 4.8mV 和 9.6mV , 或测量值不超过试验前测量值的 1.5 倍, 二者之间取低值。

2.4.14 非螺纹型接线端子排的老化试验

(1) 试验设备: 低压大电流设备, 自动控制高温试验箱, 温度测试仪。

(2) 试验方法及要求:

1) 接线端子排老化试验:

a. 接线端子排按图 6.17-1 所示连接, 试验时连接的导线截面积与温升试验相同。

b. 将接线端子排放置在初始温度保持为 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 试验箱中, 然后进行电压降测量。试验过程中及完成全部电压降测量前整个试验装置不得移动。

c. 试验要求: 正常使用条件 (最高 40°C) 的接线端子排, 加热箱内温度升至 40°C , 在此温度的 $\pm 5^\circ\text{C}$ 范围内, 保温约 10min , 试验过程中电流按表 6.17-3 规定施加。然后使接线端子排冷却至 30°C (允许强迫冷却), 并在此温度下保温约 10min 。加热箱加热和冷却速度指导值约为 $1.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

d. 试验样品每经过 24 次温度循环以及完成 192 次温度循环之后进行电压降测量, 每次测量时的温度为 $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 。

e. 试验后进行外观和拉出检查。

2) 保护导体接线端子排的老化试验:

a. 将 5 片保护导体接线端子互相绝缘放置, 不用支架安装, 如图 6.17-5 所示。如果与支架的连接是非螺纹的, 采用 5 片保护导体接线端子安装到支架上, 如图 6.17-6 所示, 连接的导线截面积与温升试验相同。

b. 将接线端子排放置在初始温度保持为 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 试验箱中, 然后进行电压降测量。试验过程中, 完成全部电压降测量前整个试验装置不得移动。

c. 试验要求: 正常使用条件 (最高 40°C) 的保护导体

接线端子排, 加热箱温度升高至 85°C , 并在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 的范围内保持约 10min 。若制造商规定的最高使用条件温度高于 40°C , 加热箱的温度应在制造商规定的温度上再增加 45K 。

然后将保护导体接线端子排冷却至接近 30°C (允许强迫冷却), 在此温度下保持约 10min 。加热箱加热和冷却速度的指导值约为 $1.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

d. 保护导体接线端子排每经过 24 次温度循环, 以及完成 192 次温度循环之后进行电压降测量, 每次测量时的温度为 $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 。

e. 试验后进行外观和拉出检查。

(3) 试验结果及判定:

1) 对于接线端子排, 试验前所测电压降不超过 3.2mV , 试验期间及试验后所测量电压降不超过 4.8mV , 或第 24 次循环后测得的电压降的 1.5 倍, 二者之间取低值。

2) 对于保护导体接线端子排, 试验前所测电压降 U_{cc} 不超过 3.2mV , 电压降 U_{cs} 不超过 6.4mV , 试验期间及试验后电压降 U_{cc} 和电压降 U_{cs} 的值分别不超过 4.8mV 和 9.6mV , 或第 24 次循环后所测得的电压降的 1.5 倍, 二者之间取低值。

3) 试验后, 接线端子排和保护导体接线端子排没有开裂、变形等影响继续使用的变化。在拉出试验过程中, 导线既不脱出接线端子, 又不允许在紧固件处折断。

2.4.15 耐火和非正常热试验

(1) 试验设备: 针焰试验设备。

(2) 试验方法及要求:

1) 试验方法: 采用针焰方法。

2) 样品预处理: 试验开始之前, 将 3 个接线端子块放置在温度 $15 \sim 35^\circ\text{C}$, 相对湿度 $45\% \sim 75\%$ 的环境中存放 24h 。

3) 试验严酷等级: 试验火焰高度 $12\text{mm} \pm 1\text{mm}$, 火焰施加时间 10s 。对于绝缘板厚度小于 1mm 和/或截面积小于 100mm^2 , 火焰施加 5s 。

燃烧气体使用 95% 以上纯度的丁烷或丙烷气作为基准气。在不受通风影响的场所进行此项试验。

4) 试验过程: 依次将 3 个接线端子块按图 6.17-8 所示固定, 在夹紧件区域之内使火焰尖端和绝缘侧壁接触, 在距样品底部 $200\text{mm} \pm 5\text{mm}$ 处放一层铺底层 (包有绢纸的 10mm 厚白色松木板)。试验过程中对铺底层和试验样品持续燃烧时间等情况进行观察和记录。

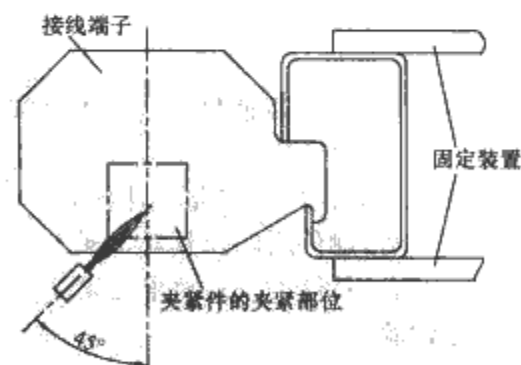


图 6.17-8 试验火焰接触点

(3) 试验结果判定:

1) 不产生火焰和灼热现象。

2) 在移开火焰之后, 样品被点燃情况下, 如果持续燃烧的时间小于 30s , 则认为被试的接线端子块通过本试验。此外, 如果从接线端子块上掉落的燃烧颗粒落至松木板的绢纸上, 绢纸不应被点燃。

满足以上任意一项为合格。

2.4.16 验证 EMC 性能

(1) 抗扰度: 本部分范围内的接线端子排对电磁场干扰不敏感, 因此无需进行抗扰度试验。

(2) 发射: 本部分范围内的接线端子排不产生电磁干扰, 因此无需进行发射试验。

3 低压抽出式成套开关设备和控制设备辅助电路用接插件试验

3.1 适用范围

本试验规定了低压抽出式成套开关设备和控制设备辅助电路用接插件的试验要求和试验方法等内容。适用于额定电压交流 380V 及以下 (频率 50Hz 或 60Hz) 或直流 220V 及以下的电路中, 连接圆铜导线截面积 $0.75 \sim 2.5 \text{ mm}^2$ 的接插件。

3.2 试验依据

JB/T 10263--2001《低压抽出式成套开关设备和控制设备 辅助电路用接插件》。

3.3 试验环境条件

试验应在温度 $+15^\circ\text{C} \sim +35^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $45\% \sim 75\%$ 、大气压 $(86 \sim 106) \times 10^3 \text{ Pa}$ 、污染等级不低于 3 级, 安装类别不低于 III 类的条件下进行。

3.4 试验项目

外观、标志及尺寸检查、机械强度试验、耐热性能试验、着火危险性能试验、相比漏电起痕指数 (CTI) 测定、耐振动试验、机械寿命试验、额定截面积试验、介电性能试验、耐湿热性能试验、温升试验、电压降测量、耐老化性能试验。

3.5 试验方法

3.5.1 外观、标志及尺寸检查

(1) 测量工具: 目测, 游标卡尺。

(2) 试验方法及要求:

1) 外观及尺寸检查: 零部件表面粗糙度、镀层外观质量、绝缘件外观质量及尺寸检查应符合图样和设计文件的要求。组装后的接插件不应有明显的松动和变形, 接插件的每一电路应在明显处留有标记的位置。

2) 标志检查: 接插件具有字迹清晰、经久耐用的标志, 并标明制造商名称或商标、接插件的型号和主要技术数据、标准编码等。

3) 电气间隙和爬电距离的测量: 用游标卡尺测量辅助电路用接插件的相邻接触件之间及其对金属支架之间的最小电气间隙和爬电距离。具体方法及要求见第 2 章。

3.5.2 机械强度试验

(1) 试验设备: 扭力螺钉旋具。

(2) 试验方法及要求:

1) 试验应在 2 个接线端子上进行。分别采用最大、最小截面积的合适型号铜导线或电缆进行试验, 对每个接线端子应接上和拆下导线 5 次, 对于螺纹型的接线端子, 拧紧力矩应按表 6.17-2 规定值或为制造商规定力矩值的 110% 来进行试验。

2) 每次拧紧的螺钉或螺母松掉后, 再采用新的导线进行下一次拧紧试验。

(3) 试验结果判定:

1) 试验过程中紧固件和接线端子不能松掉, 试验后不能有影响继续使用的损坏为合格。

2) 试验前所测电压降不得超过 4mV, 试验后所测电压降不得超过试验前测量值的 150% 为合格。

3.5.3 耐热性能试验

(1) 试验设备: 高温恒温箱, 球压装置, 游标卡尺或显微镜。

(2) 试验方法及要求:

1) 绝缘材料样品厚度至少为 2mm, 厚度不足 2mm 可用数层叠加。

2) 球面压力试验时, 被试样品的平面放置在由钢性平板支撑的水平位置, 钢板的厚度至少 5mm, 钢球直径为 5mm, 球垂直施加在被试样品表面上的力为 20N, 并将它放置在 $125^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 的试验箱内, 持续 1h。

3) 试验后移去钢球, 把样品立即浸入冷水中, 在 10s 内应冷却至接近室温。然后测量钢球沉入样品所形成的直径。

试验后, 测量钢球沉入样品所形成的直径不超过 2mm 为合格。

3.5.4 着火危险性能试验

(1) 试验设备: 灼热丝试验仪。

(2) 试验方法及要求:

1) 试验方法: 采用灼热丝方法。

2) 试验严酷等级: 用于固定载流部件所使用的绝缘材料, 灼热丝顶部的温度可选择 $850^\circ\text{C} \pm 15^\circ\text{C}$ 或 $960^\circ\text{C} \pm 15^\circ\text{C}$, 试验施加时间为 $30\text{s} \pm 1\text{s}$ 。

3) 样品预处理: 试验开始之前, 样品一般在温度 $15 \sim 35^\circ\text{C}$, 相对湿度 $45\% \sim 75\%$ 的大气中处理 24h 后开始试验。

4) 为了评定燃烧的蔓延性, 在距离样品底部 $200\text{mm} \pm 5\text{mm}$ 处放一层铺底层 (包有绢纸的白色木板)。

5) 将样品固定在灼热丝试验仪上, 灼热丝顶部尽量施加在平的样品表面上, 施加压力 $1\text{N} \pm 0.2\text{N}$, 试验过程中对铺底层、试验样品起燃时间等情况进行观察和记录。

(3) 试验结果判定:

1) 无火焰或不灼热。

2) 如果试验样品产生燃烧或灼热, 但在灼热丝移去后 30s 内熄灭, 而下面的铺底层又未完全烧着; 当铺底层使用了绢纸覆盖的松木板时, 绢纸不应着火, 松木板不应烧焦。

满足以上任意一项为合格。

3.5.5 相比漏电起痕指数 (CTI) 测定

(1) 试验设备: 相比漏电起痕指数测试仪, 电导率仪, 百分表。

(2) 试验方法及要求: 相比漏电起痕指数 (CTI) 即是材料表面能经受住 50 滴电解液而没有形成漏电痕迹的最高电压值, 以 V 表示。

1) 试验样品尺寸不小于 $15\text{mm} \times 15\text{mm}$, 厚度不小于 3mm, 并用无水乙醇对样品表面进行清洁处理。

2) 在 $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的环境条件下按表 6.17-8 配制氯化氨试验溶液。

3) 施加试验电压可在 $100 \sim 600\text{V}$ 之间连续可调, 频率为 $48 \sim 60\text{Hz}$, 波形基本上是正弦波, 其电源功率应不小于 0.5kVA。可调节电阻应能调节两电极间的短路电流 $1.0\text{A} \pm 0.1\text{A}$, 并且在此电流值下, 电压表指示的电压下降值不应

超过 10%。

4) 试验应在温度为 $(23 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ 的环境条件下进行。样品水平地放置在绝缘(或金属)支撑板上,用量规检查两电极间的距离为 $4.0\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ 。接通电源,调节电压到一个预先选择好的值并进行试验,电解液以 $30\text{s} \pm 5\text{s}$ 的时间间隔滴到两电极中间样品上,直到样品经受住 50 滴溶液或样品发生破坏为止。

5) CTI 值的测定:调节电压到一个预先选择好的值并进行试验,直到试样经受住 50 滴溶液或试样发生破坏为止。在试样的其他试验点上施加更低或更高的电压再做试验,直到得出在 5 个不同的试验点上对 50 滴溶液不发生破坏的最高电压值。如果将这个最高电压值降低 25V,在另外的 5 个试验点上再做试验时,直到 100 滴溶液试样也没有发生破坏的话,则这个最高电压值就是 CTI,例如 CTI425(400)。

(3) 试验结果判定:

1) 试验过程中,当在样品表面两电极间的导电通路中流过 0.5A 或更大的电流时,CTI 测试仪内的过电流继电器延时 2s 动作,或过电流继电器虽未动作,但样品燃烧了,均认为已发生破坏,为不合格。

2) 试验后测定的绝缘材料 $\text{CTI} \geq 175$ 为合格,具体选值由产品标准规定。

表 6.17-8 溶液的配比

试验溶液	100mL 蒸馏水或去离子水中加入		23℃±1℃ 时的电阻率 (Ω·cm)
	氯化铵(NH_4Cl) (g)	烷基苯磺酸钠 ($\text{R} \cdot \text{C}_{10}\text{H}_6 \cdot \text{SO}_3\text{Na}$)(g)	
A	0.1 ± 0.002	—	395 ± 5
B	0.1 ± 0.002	0.5 ± 0.002	170 ± 5

3.5.6 耐振动试验

(1) 试验设备:振动试验台,示波器。

(2) 试验方法及要求:接插件的振动试验包括 3 个程序,即初始振动响应检查、扫频试验、最后振动响应检查,原则上 3 个程序的振动试验应分别在 3 个互相垂直的轴向进行(在水平互相垂直的轴向上接插件—水平放置—垂直放置),即在相同方向依次进行 3 个程序试验过程中,产品处于带电工作状态,用示波器和信号灯检测振动试验期间的工作情况。

1) 初始振动响应检查:

频率范围:10~150Hz。

振幅值:应等于或小于扫频试验法所取得的振幅值。

时间:在规定的频率范围内充分扫描以发现并确定共振点为原则。

2) 扫频试验:

频率范围:10~150Hz。

振幅值:10~60Hz 为恒定位移 0.75mm,60~150Hz 为恒定加速度 10g。

时间:每个方向的扫频试验时间为 40min。

3) 最后振动响应检查:

频率:根据最初振动响应检查中确定的最显著的点选取共振频率(在规定的频率范围内如发现多个共振频率,原则上只选取其中共振响应最严重的一种频率)。

振幅值:共振频率在 60Hz 以下,取恒定位移 0.75mm,60Hz 以上取恒定加速度 10g。

时间:每个方向的振动响应检查的时间为 40min。

(3) 试验结果判定:试验过程中电路没有接触不良现象,插头不应在插座中摇摆或脱落。试验后接插件各部分无明显机械损伤或变形,紧固件无松动、导线无断裂损坏为合格。

3.5.7 机械寿命试验

(1) 试验设备:机械寿命试验装置。

(2) 试验方法及要求:

1) 将接插件的插头、插座固定在机械寿命试验装置上,保持轴向一致,从试验位置至接通位置再返回试验位置为 1 个循环。连续进行 500 次,操作频率为 5 次/min。

2) 试验后,按本章 3.5.11 方法测量接插件接线端子处的温升和插接点处的温升。

(3) 试验结果判定:

1) 试验前,接插件接线端子处的温升不得超过 45K,插接点处的温升不得超过 50K 为合格。

2) 试验后,接插件接线端子处的温升和插接点处的温升不得超过试验前测量值 10K 为合格。

3.5.8 额定截面积试验

按本章 2.4.12 规定进行试验。

对弹性连接的端子接入最大截面积的导线后,不能因弹性接触件的受压移动而受力。

3.5.9 介电性能试验

(1) 工频耐压试验:将试验样品安装在金属支架上,并接入额定截面积的导线。试验电压分别施加在相邻的带电部件及金属支架之间,施加 1min。试验电源频率在 45~62Hz 之间,电源高压输出端短路的电流不小于 0.5A。具体试验方法及要求见第 2 章。

(2) 冲击耐受电压试验:冲击耐受电压的施加部位与工频耐压试验相同,试验时,每一极性各施加 5 次,最小时间间隔为 1s。方法及要求见第 2 章。

3.5.10 耐湿热性能试验

按本章 2.4.8 规定进行试验。

在试验结束前(低温高湿阶段)1h 或 2h 中验证试验样品的工频耐压,试验电压值按第 2 章介电性能试验规定的 80% 施加 1min。

3.5.11 温升试验

(1) 试验设备:低压大电流设备,温度测试仪。

(2) 试验方法及要求:

1) 按图 6.17-9 或图 6.17-10 所示接线进行试验。

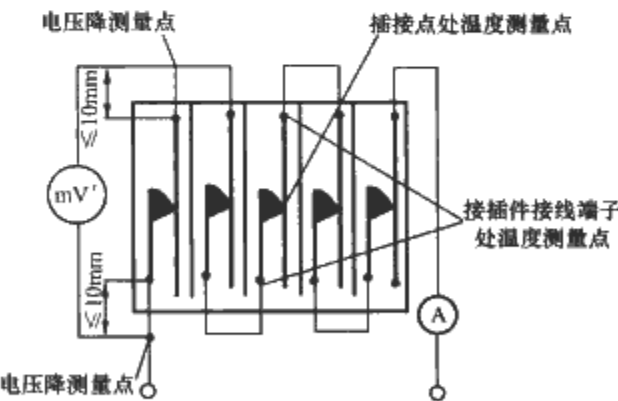


图 6.17-9 触指式接插件电压降测量和温升试验接线图

2) 用单相交流电流进行试验,试验电流按表 6.17-9 规定值选取。试验持续至达到稳定温度为止,连续测温 3 次,每次间隔 5min。当任意两次所测温度的变化小于 1K 时,则认为达到稳定温度,此时测量接插件的温升。

3) 试验结束,待接插件冷却至周围空气温度后测量电

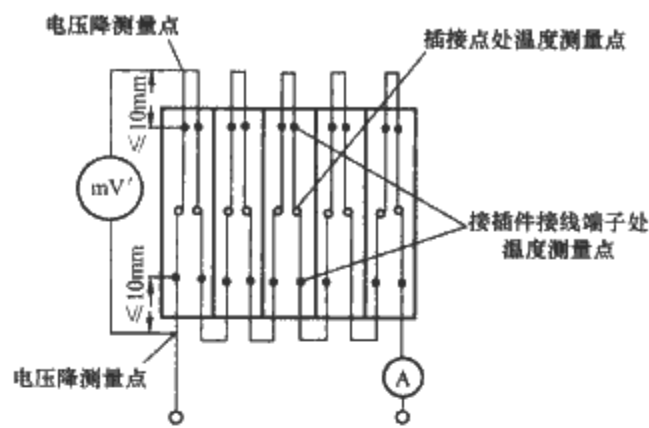


图 6.17-10 阴式接插件电压降测量和温升试验接线图

压降值。

(3) 试验结果判定：

- 1) 温升试验过程中，接插件接线端子处的温升不超过 45K，插接点处的温升不超过 50K 为合格。
- 2) 温升试验前所测电压降不得超过 4mV，试验后所测电压降不超过试验前测量值的 150% 为合格。

表 6.17-9 对于标准截面积导线进行温升、老化和电压降试验时的试验电流值

额定截面积(mm ²)	0.75	1	1.5	2.5
试验电流(A)	9	13.5	17.5	24

3.5.12 电压降测量

- (1) 试验设备：恒流电流源，直流数字电压表。
- (2) 试验方法及要求：

- 1) 接插件在下列情况下进行电压降测量：在机械强度试验前后、在温升试验前后、在耐老化性能试验前后及期间进行。
- 2) 机械强度试验应在一副组装后的接插件上进行。先用制造商规定的最大连接截面积的硬导线试验，然后用制造商规定的最小连接截面积的软导线试验，试验时按表 6.17-2 规定的力矩值或制造商规定的较大力矩值固定导线。
- 3) 按图 6.17-9 或图 6.17-10 所示测量各接插件的电压降，测量时采用直流电流法，试验电流按表 6.17-9 规定电流值的 0.1 倍选取。
- (3) 试验结果判定：电压降测量值应满足机械强度、温升和老化性能试验的要求。

3.5.13 耐老化性能试验

- (1) 试验设备：调压器，自动控制温度试验箱，温度测试仪。
- (2) 试验方法及要求：
- 1) 接插件按图 6.17-9 或图 6.17-10 所示连接，试验时连接的导线截面积与温升试验相同。
- 2) 将经电压降测试的试验样品放置在起始温度保持为 20℃±2℃试验箱中。
- 3) 试验期间，除冷却周期以外，通电电流按表 6.17-9 规定值施加，在全部试验过程中不得移动。
- 4) 试验样品承受 200 次温度循环试验，每次循环试验历时约 1h。一个周期循环为：试验箱的温度在 20min 左右时间内升到 40℃，保温约 10min，然后用 20min 左右的时间冷却至接近 30℃，并在此温度下保温约 10min。
- 5) 试验样品每经过 25 次温度循环以及完成 200 次温度

循环之后进行电压降测量，每次测量时的温度为 20℃±5℃。

6) 试验后进行外观和拉出检查。

(3) 试验结果判定：

- 1) 耐老化性能试验前所测电压降不得超过 4mV，试验过程中和试验后所测电压降不得超过 4.8mV 或第 25 次循环后测得的电压降的 1.5 倍为合格。
- 2) 试验后接插件不应出现开裂、变形等影响其继续使用的变化为合格。

4 低压成套开关设备和控制设备用母线架试验

4.1 适用范围

本试验简述了低压成套开关设备和控制设备用母线架产品的试验方法及要求，适用于低压成套开关设备和控制设备及其他电气设备中安装固定母线用的母线架产品。

4.2 试验依据

JB/T 10316—2002《低压成套开关设备和控制设备用母线架》。

4.3 试验环境条件

试验应在温度 10~40℃、相对湿度 45%~75%、污染等级不低于 3 级、安装类别不低于Ⅲ类的条件下进行。

4.4 试验项目

外观、标志及尺寸检查、电气间隙和爬电距离的测量、耐热性能试验、着火危险性能试验、相比漏电起痕指数 (CTI) 测定、介电性能试验、耐湿热性能试验、短路耐受强度试验。

4.5 试验方法

4.5.1 外观、标志及尺寸检查

- (1) 测量工具：目测，游标卡尺。
- (2) 试验方法及要求：
- 1) 外观检查：零部件表面粗糙度，绝缘件外观质量应符合图样和设计文件的要求。
- 2) 标志检查：母线架应具有字迹清晰、经久耐用的标志，并表明下列内容：便于识别的制造商名称或商标、母线架的型号和主要技术数据、标准编号等。
- 3) 尺寸检查：用游标卡尺或卷尺测量母线架的外形尺寸和安装尺寸，应符合产品图样规定。

4.5.2 电气间隙和爬电距离的测量

用游标卡尺测量带电部件之间及其对金属支架之间的最小电气间隙和爬电距离。具体方法及要求见第 2 章。

4.5.3 耐热性能试验、相比漏电起痕指数 (CTI) 测定、介电性能试验

分别按本章 3.5.3；3.5.5；3.5.9 规定进行试验。

4.5.4 着火危险性能试验

- (1) 按本章 3.5.4 规定进行。
- (2) 试验严酷等级：用于固定载流部件所使用的绝缘母线架，灼热丝顶部的温度可选择 850℃±15℃ 或 960℃±15℃；用于支撑保护接地导体的绝缘母线架，灼热丝顶部的温度可选择 650℃±10℃。其试验结果符合本章 3.5.4 规定。

4.5.5 耐湿热性能试验

按本章 3.5.10 规定进行，试验严酷等级优先采用高温 55℃，周期为 2 个昼夜。

4.5.6 短路耐受强度试验

- (1) 试验设备：短路耐受强度试验系统。
- (2) 试验方法及要求：

1) 如图 6.17-11 所示，将相适应的母排固定在绝缘母线架上，并将母线架安装在金属支架上，按表 6.17-10 规定系数 n 的标准值和相应的功率因数通以短路峰值电流，时间为 0.1s，共做 3 次。

2) 每次母线架 A1、A2、A3 安装位置互易。图中 L 为 A1~A3 母线架间距，具体数值由产品标准规定，试验母排长度为 $3L$ ，试验母排规格由产品标准规定。

3) 试验后检查电气间隙、爬电距离及介电性能，方法及要求见第 2 章。

表 6.17-10 系数 n 标准值和相应的功率因数

短路电流的方均根值 I	$\cos\varphi$	n
$I \leq 5\text{kA}$	0.7	1.5
$5\text{kA} < I \leq 10\text{kA}$	0.5	1.7
$10\text{kA} < I \leq 20\text{kA}$	0.3	2
$20\text{kA} < I \leq 50\text{kA}$	0.25	2.1
$50\text{kA} < I$	0.2	2.2

注 表中的值适合与大多数用途在某些特殊的场合，例如在变压器或发电机附近，功率因数可能更低。因此，最大的预期峰值电流就可能变为极限值以代替短路电流的方均根值。

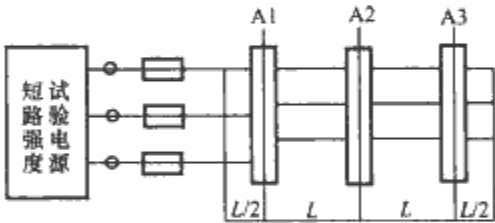


图 6.17-11 短路耐受强度试验

5 端头试验

5.1 适用范围

适用于连接导线从 0.5~6.0mm² 范围内裸压接端头和带绝缘层的预绝缘端头；对于连接导线从 10~300mm² 范围内只适用于铜裸压接端头，一般应用于电控、低压配电、继电保护、电力电子和机床电器等电气成套设备中；预绝缘端头适用于电压 660V 及以下的电路中。

5.2 试验环境条件

应在温度 15~35℃、相对湿度 45%~75%、气压 86~106kPa 范围内进行试验。

5.3 试验依据

JB/T 2436.1—1992《导线用铜压接端头 第 1 部分：0.5~6.0mm² 导线用铜压接端头》；JB/T 2436.2—1994《导线用铜压接端头 第 2 部分：10~300mm² 导线用铜压接端头》。

5.4 试验项目

见表 6.17-11 和表 6.17-12。

表 6.17-11 0.5~6.0mm² 导线用铜压接端头试验程序

试验样品	检测项目	检测程序
裸端头	外观和尺寸检查，镀层厚度检查	a. 外观和尺寸检查 b. 镀层厚度检查
	温升试验，热循环试验	a. 温升试验 b. 热循环试验
	耐盐雾试验	a. 压接电阻试验 b. 盐雾试验 c. 压接电阻试验
	短时耐受电流试验，耐拉力试验	a. 压接电阻试验 b. 短时耐受电流试验 c. 压接电阻试验 d. 耐拉力试验
	拉力扭曲试验，耐拉力试验	a. 压接电阻试验 b. 拉力扭曲试验 c. 压接电阻试验 d. 耐拉力试验
预绝缘端头	外观和尺寸检查，镀层厚度试验	a. 外观和尺寸检查 b. 镀层厚度试验
	耐油试验	a. 耐油试验 b. 介电强度试验
	耐老化试验	a. 耐老化试验 b. 介电强度试验
	温升试验，热循环试验	a. 温升试验 b. 热循环试验
	低温压接试验	a. 低温压接试验 b. 介电强度试验
	短时耐受电流试验，耐拉力试验	a. 短时耐受电流试验 b. 耐拉力试验
	拉力扭曲试验，耐拉力试验	a. 拉力扭曲试验 b. 耐拉力试验
	绝缘套固定度试验	
	着火危险试验	
	复原试验	

表 6.17-12 10~300mm² 导线用铜压接端头试验程序

试验样品	检测项目	检测程序
裸端头	外观和尺寸检查	a. 外观检查 b. 尺寸检查
	热循环试验	a. 压接电阻试验 b. 热循环试验 c. 压接电阻试验
	耐盐雾试验	a. 压接电阻试验 b. 耐盐雾试验 c. 压接电阻试验
	短时耐受电流试验，耐拉力试验	a. 压接电阻试验 b. 短时耐受电流试验 c. 压接电阻试验 d. 耐拉力试验

5.5 试验方法

5.5.1 外观、镀层厚度及尺寸检查

- (1) 试验设备：目测，游标卡尺。

- (2) 试验方法及要求:
- 1) 外观检查: 端头表面不应有毛刺、变形、开裂、泛点、起皮、发黑、凸起、焊料外溢等缺陷。端头产品的表面应有不易磨损和字迹清楚的标记、产品商标或厂标及主要参数。
- 预绝缘端头的绝缘套与裸端头的配合应紧密、无松动, 绝缘套壁厚应均匀、颜色一致。
- 2) 端头表面的镀层厚度不得小于: 镀锡 9 μ , 镀银 6 μ 。
- 3) 尺寸检查应符合行业统一设计管理的产品图样要求。

5.5.2 温升试验

- (1) 试验设备: 热循环控制装置, 温度测试仪, 扭力螺钉旋具。
- (2) 试验方法及要求:
- 1) 温升试验的接线如图 6.17-12 所示。连接用绝缘导线的长度不小于 1m, 按表 6.17-14 规定的扭力矩值拧紧紧固

件, 并按表 6.17-13 规定通过温升试验电流。待测试点的温度稳定后, 测量其温度 (温度稳定指每隔 10min 测量 1 次, 连续测量 3 次, 其变化值不超过 1℃)。

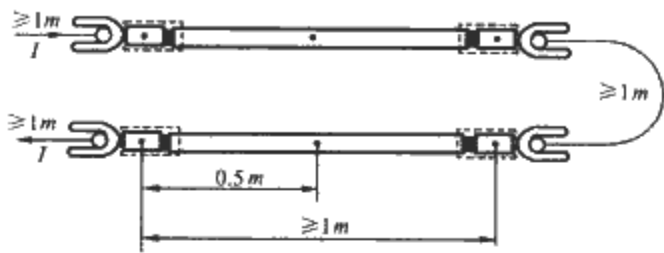


图 6.17-12 温升示意图

- 2) 温度的测量用热电偶法, 热电偶基线的线径为 0.2~0.3mm。
- (3) 试验结果判定: 端头与导线压接部位的温升不超过 30K 为合格。

表 6.17-13 标准端头的温升、热循环、压接电阻、短时耐受电流试验值及拉力负荷值

端头规格	与端头配合的导线截面积 (mm ²)	温升试验电流值 AC (A)	热循环		压接电阻试验电流 DC (A)	短时耐受电流试验值 AC (A)	拉力负荷值 (N)	
			试验电流值 AC (A)	通电时间 (min)			预绝缘端头	裸端头
0.5	0.5	6.0	10	45	1.8	60	60	75
1.0	0.75	9	14		2.7	90	90	120
	1.0	12	18		3.6	120	100	160
1.5	1.5	16	24		4.8	180	140	220
2.5	2.5	21	32		6.3	300	190	320
4.0	4	28	42		8.4	480	275	500
6.0	6	36	54		11	720	360	650
10	10	—	71		8	1200	—	800
16	16	—	95		10	1920	—	980
25	25	—	124		13	2750	—	1200
35	35	—	154	60	15	3000	—	1500
50	50	—	190		20	5000	—	1800
70	70	—	238		25	6300	—	2200
95	95	—	288		30	8800	—	2800
120	120	—	336	90	35	13 000	—	3500
150	150	—	397		40	14 000	—	4100
185	185	—	448		45	18 500	—	4200
240	240	—	541		55	26 600	—	4500
300	300	—	632		65	28 000	—	4700

表 6.17-14 紧固件扭力矩值

0.5~6.0mm ² 导线用铜压接端头		10~300mm ² 导线用铜压接端头	
紧固件螺纹直径 (mm)	扭力矩 (N·m)	紧固件螺纹直径 (mm)	扭力矩 (N·m)
2	0.3	4	1.0~1.3
2.5	0.4	5	2.0~2.5
3	0.5	6	4.0~4.9
3.5	0.8	8	8.9~10.8
4	1.2	10	18.0~23.0
5	2.0	12	31.5~39.5
6	3.0	14	51.0~61.0
8	6.0	16	78.5~98.0
10	10.0	18	113.0~137.0
		20	157.0~196.0

5.5.3 压接电阻试验

- (1) 试验设备: 交直流数字电压表, 直流恒流源, 刺透类的测棒。
- (2) 试验方法及要求: 本试验适用于裸端头进行压接电阻的测试。
- 1) 在下列情况下验证压接电阻: 在盐雾试验后、在短时耐受电流试验后、在拉力扭曲试验后、在热循环试验后进行。
- 2) 压接电阻试验如图 6.17-13 所示。紧固件的扭力矩应

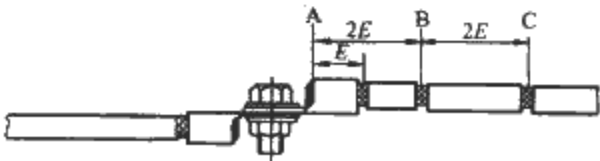


图 6.17-13 压接电阻试验

按表 6.17-14 规定选取,并通以表 6.17-13 规定的试验电流。采用直流电流法测量端头和导线压接部位的电阻 R_{AB} ,以及相邻同长导线的电阻 R_{BC} (精确到 $10^{-6}\Omega$)。测量电阻时需刺透类的测棒,每次测量时间不大于 5s。

3) 对于 $0.5\sim6.0\text{ mm}^2$ 导线用铜压接端头,求出电阻变化值为

$$\text{电阻变化值} = \frac{R_{AB2} - R_{AB1}}{R_{AB1}} \times 100\%$$

式中: R_{AB1} 为试验前 AB 间的电阻; R_{AB2} 为试验后 AB 间的电阻。

4) 对于 $10\sim300\text{ mm}^2$ 导线用铜压接端头,还增加计算接触电阻为

$$\text{接触电阻} = R_{AB} - \frac{1}{2}R_{BC} \quad (\Omega)$$

$$\text{接触电阻与同长导线电阻比值} = \frac{2R_{AB} - R_{BC}}{R_{BC}}$$

式中: R_{AB} 为 AB 间的电阻; R_{BC} 为 BC 间的电阻。

(3) 试验结果判定:压接电阻测量值满足盐雾、短时耐受电流、拉力扭曲和热循环试验的要求为合格。

5.5.4 热循环试验

(1) 试验设备:热循环控制装置,温度测试仪。

(2) 试验方法及要求:

1) 热循环试验接线与温升试验相同,如图 6.17-12 所示。连接用绝缘导线的长度不小于 1m。紧固件扭力矩按表 6.17-14 的规定选取,并按表 6.17-13 规定的热循环时间通以试验电流,然后再断电相同的时间,作为 1 次试验循环,共进行 125 次。对于 $0.5\sim6.0\text{ mm}^2$ 导线用铜压接端头,测量第 25 次和 125 次热循环时端头压接部位及距连接导线 0.5m 处的温升。对于 $10\sim300\text{ mm}^2$ 导线用铜压接端头,测量第 50、100、125 次热循环时端头压接部位及距连接导线 0.5m 处的温升。

2) 温度的测量用热电偶法,热电偶基线的线径为 $0.2\sim0.3\text{ mm}$ 。

3) 对于 $10\sim300\text{ mm}^2$ 导线用铜压接端头,在试验前后测量压接电阻。

(3) 试验结果判定:

1) $0.5\sim6.0\text{ mm}^2$ 导线用铜压接裸端头和预绝缘端头,在第 25 次热循环周期时压接部位的温升不高于距连接导线 0.5m 处的温升,第 125 次热循环时的温升不超过第 25 次热循环温升 8K。

2) $10\sim300\text{ mm}^2$ 导线用铜压接端头试验时,端头压接部位的温升比距离连接导线 0.5m 处的温升不得大于 8K,第 125 次热循环后的压接部位电阻不大于试验前电阻的 1.5 倍。

5.5.5 耐盐雾试验

(1) 试验设备:盐雾试验箱。

(2) 试验方法及要求:

1) 将裸端头在试验前用酒精或丙酮作脱脂去污处理。

2) 配制盐溶液:盐溶液采用氯化钠和蒸馏水配置,其浓度为 $(5\pm0.1)\%$ (质量百分比)。雾化前盐溶液的 pH 值在 $6.5\sim7.2$ ($35^\circ\text{C}\pm2^\circ\text{C}$) 之间。

3) 将已压接导线的裸端头放在 $35^\circ\text{C}\pm2^\circ\text{C}$ 的试验箱内连续喷雾,持续时间 24h。试验结束后,清理样品表面盐沉积物,在标准大气条件下恢复 1~2h。

(3) 试验结果判定:

1) 试验后,样品不出现基材外露、镀层有泛点或麻点等缺陷,但不包括连续冲压加工制成成串端头的剪落截面部位。

2) 盐雾试验前,端头和导线压接部位的电阻不大于所连接同长导线的电阻,试验后电阻的变化不大于试验前电阻的 20%。

5.5.6 耐拉力试验

(1) 试验设备:拉力试验机。

(2) 试验方法及要求:按表 6.17-14 规定扭力矩值拧紧紧固件,施加表 6.17-13 规定的拉力负荷值,拉力负荷应与导线的轴向一致。拉伸速度为 25 mm/min ,并保持 10s。

试验时,不产生端头与导线间的滑动、导线在压接部位断裂或拔出、端头变形等缺陷为合格。

5.5.7 短时耐受电流试验

(1) 试验设备:短时耐受电流试验系统。

(2) 试验方法及要求:

1) 短时耐受电流试验的接线与温升试验相同,如图 6.17-12 所示,按表 6.17-14 规定的扭力矩值拧紧紧固件,并按表 6.17-13 规定通以热循环试验电流。对于 $0.5\sim6.0\text{ mm}^2$ 导线用铜压接裸端头和预绝缘端头,试验通电时间 2s。对于 $10\sim300\text{ mm}^2$ 导线用铜压接裸端头试验通电时间 1s,允许在电流(瞬时)平方乘时间积分值不变条件下,降低试验电流并增加通电时间或反之。

2) 短时耐受电流试验前后,测量压接电阻。试验后,对裸压接端头和预绝缘端头再进行耐拉力试验。

(3) 试验结果判定:

1) 试验后,端头不应产生变形、熔接、熔断、导线脱出和其他有碍使用的缺陷。

2) 短时耐受电流试验前,端头和导线压接部位的电阻不大于所连接同长导线的电阻;试验后,电阻变化不大于试验前电阻的 20%。

3) 耐拉力试验后,不产生端头与导线间的滑动、导线在压接部位断裂或拔出、端头变形等缺陷为合格。

5.5.8 拉力扭曲试验

(1) 试验设备:拉力扭曲试验机。

(2) 试验方法及要求:

1) 将已压接导线的端头固定在拉力扭曲试验机上,试验参数见表 6.17-15 的规定。

2) 对于裸压接端头,扭曲试验前后测量压接电阻,然后对裸压接端头和预绝缘压接端头进行耐拉力试验。

(3) 试验结果的判定:

1) 试验后,裸压接端头和预绝缘压接端头不应产生导线在压接部位断裂或拔出、端头损坏或裂痕,以及其他有碍于使用的缺陷。

2) 拉力扭曲试验前,裸端头和导线压接部位的电阻不大于所连接同长度导线的电阻,试验后电阻变化不大于试验前电阻的 20%为合格。

表 6.17-15 拉力扭曲试验参数

端头所配导线截面积 (mm ²)	轴套孔直径 (mm)	试验时间 (min)	高度 h (mm)	重力 W (N)
0.5	6.4	30	260	5
0.75~1.5	6.4	30		9
2.5	9.5	30	280	13.5
4.0~6.0	9.5	30		22.5

5.5.9 介电强度试验

- (1) 试验设备：耐压测试仪，绝缘电阻表。
- (2) 试验方法及要求：在预绝缘端头的绝缘套压接部位表面包上金属箔作为电极，然后用 1000V 的绝缘电阻表测量该电极和导线线芯之间的绝缘电阻，再在金属箔和绝缘导线线芯之间施加 2500V 交流试验电压（频率 50Hz 或 60Hz），持续时间 1min。
- (3) 试验结果判定：
 - 1) 测定绝缘电阻不小于 10MΩ 为合格。
 - 2) 试验时不出现绝缘击穿、表面闪络等现象为合格。

5.5.10 耐油试验

- (1) 试验设备：高温恒温箱。
- (2) 试验方法及要求：将已压接导线的预绝缘端头放到变压器油中，然后置于试验箱内加热至 70℃±3℃，恒温 4h 后取出进行介电强度试验。
- (3) 试验结果判定：
 - 1) 绝缘套不产生裂痕、膨胀变形或其他有碍使用的缺陷为合格。
 - 2) 介电强度试验时，无绝缘击穿和表面闪络等现象为合格。

5.5.11 耐老化试验

- (1) 试验设备：高温恒温试验箱。
- (2) 试验方法及要求：将已压接导线的预绝缘端头和没有压接过的预绝缘端头同时放到表 6.17-16 所示温度的恒温箱中，放置 7 天。然后把没有压接过的预绝缘端头在常温、常湿下放置 1h 后进行压接连接。对绝缘套材料为聚酰亚胺类树脂的预绝缘端头，在常温、常湿下放置 1h 前，应先在温度 30℃±2℃、相对湿度 85%±5% 的空气中放置 24h 作调质处理。
- (3) 试验结果判定：
 - 1) 试验后，绝缘套不产生裂痕，膨胀变形等缺陷为合格。
 - 2) 介电强度试验时，无绝缘击穿、表面闪络等现象为合格。

绝缘套材料	试验温度（℃）	
	未压导线预绝缘端头	已压导线预绝缘端头
聚酰亚胺类树脂	100±3	121±3
硬质乙烯类树脂	85±2	85±2

5.5.12 低温压接试验

- (1) 试验设备：低温试验箱。
- (2) 试验方法及要求：将预绝缘端头压接工具和导线放在 -20℃±2℃ 的低温箱内，放置 1h 后取出，并在 3min 内进行压接连接，然后放置在 -55℃±2℃ 的低温箱内保持 1h 后取出，进行介电强度试验。
- (3) 试验结果判定：
 - 1) 试验后，绝缘套不产生裂痕、收缩变形或其他有碍使用的缺陷为合格。
 - 2) 介电强度试验时，无绝缘击穿、表面闪络等现象为合格。

5.5.13 绝缘套固定度试验

- (1) 试验设备：砝码，游标卡尺，秒表。
- (2) 试验方法及要求：绝缘套固定度试验如图 6.17-14

所示，在预绝缘端头的绝缘套轴向施加 25N 的静负荷，持续时间 10s。

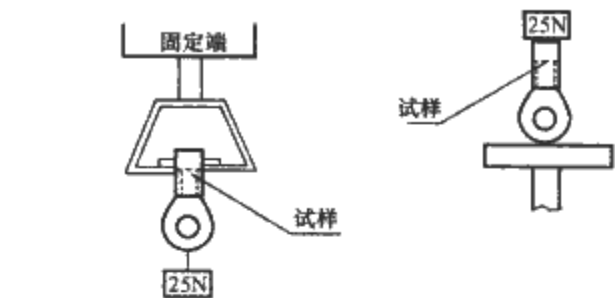


图 6.17-14 绝缘套固定度试验

- (3) 试验结果判定：试验后，绝缘套相对于端头压接部位轴向的任何一侧的最大偏移不大于 1.0mm 为合格。

5.5.14 着火危险试验

- (1) 试验设备：针焰试验设备。
- (2) 试验方法及要求：
 - 1) 着火危险试验如图 6.17-15 所示。
 - 2) 燃烧气体使用 95% 以上纯度的丁烷或丙烷气作为基准气。在不受通风影响的场所进行该项试验。
 - 3) 试样在温度为 15~35℃，相对湿度 45%~75% 的大气中放置 24h。
 - 4) 如图 6.17-15 所示，在绝缘套的中部用火焰芯部燃烧 5s 后移去，待残焰熄灭后在同一位置再烧 5s，共烧 3 次。

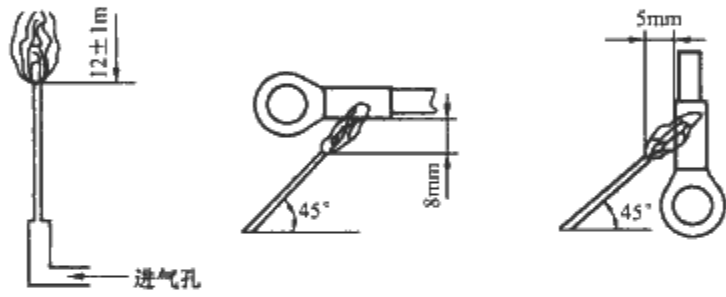


图 6.17-15 着火危险试验

- (3) 试验结果判定：预绝缘端头着火试验时，试样残焰每次留存时间小于 15s，3 次重复试验试样残焰合计的留存时间不超过 30s 为合格。

5.5.15 复原试验

- (1) 试验设备：高温恒温箱，游标卡尺。
- (2) 试验方法及要求：如图 6.17-16 所示，在常温下测量端头压接部位的最大变形尺寸然后将试样放入表 6.17-17 规定温度的恒温箱内，放置 1h 后取出。在常温下放置 30min，再测量同一位置的尺寸。



图 6.17-16 复原试验

- (3) 试验结果判定：
 - 1) 预绝缘端头复原试验后，在常温下绝缘套不脱落。
 - 2) 按下式计算绝缘套复原尺寸变化率，其值应小于或等于 35%。

绝缘套复原尺寸变化率 = $\frac{\text{试验后尺寸} - \text{试验前尺寸}}{\text{试验前尺寸}} \times 100\%$

试验温度		
预绝缘材料	硬质乙烯类树脂	聚酰亚胺类树脂
试验温度（℃）	75±3	100±3

6 低压抽出式成套开关设备和控制设备主电路用接插件试验

6.1 适用范围

本试验简述了低压抽出式成套开关设备和控制设备主电路用接插件的试验方法及要求。适用于额定电压交流 660V 以下, 频率 50Hz (或 60Hz) 直流 440V 及以下的低压抽出式成套开关设备和控制设备主电路用接插件。

6.2 试验依据

JB/T 10323—2002《低压抽出式成套开关设备和控制设备主电路用接插件》。

6.3 试验环境条件

试验应在温度 10~40℃、相对湿度 45%~75%、污染等级不低于 3 级、安装类别不低于Ⅲ类条件下进行。

6.4 试验项目

外观、标志及尺寸检查、电气间隙和爬电距离的测量、接线端子的机械强度试验、耐热性能试验、着火危险性能试验、相比漏电起痕指数 (CTI) 测定、机械寿命试验、耐老化性能试验、介电性能试验、耐湿热性能试验、温升试验。

6.5 试验方法

6.5.1 外观、标志及尺寸检查

(1) 测量工具: 目测, 游标卡尺, 卷尺。

(2) 试验方法及要求:

1) 外观检查: 零部件表面粗糙度、镀层外观质量及绝缘件外观质量应符合图样和设计文件的要求。金属件表面不得有擦伤、毛刺、腐蚀痕迹。绝缘件表面不得有裂痕、杂质、飞边、色泽不匀等缺陷。

2) 标志检查: 主电路用接插件应具有字迹清晰、经久耐用的标志, 并表明下列内容: 便于识别的制造商名称或商标、接插件的型号和主要技术数据、标准编号等。

3) 尺寸检查: 用游标卡尺或卷尺测量接插件的外形尺寸和安装尺寸, 应符合产品图样的规定。

6.5.2 电气间隙和爬电距离的测量

用游标卡尺测量主电路用接插件的带电部件之间及其对接地金属支架之间的最小电气间隙和爬电距离。在额定绝缘电压为 380~660V 时, 电气间隙和爬电距离不小于 20mm, 具体方法及要求见第 2 章。

6.5.3 接线端子的机械强度试验

(1) 按本章 3.5.2 规定进行试验。

(2) 试验结果判定:

1) 接线端子在机械强度试验中, 紧固部件和接线端子不应松脱, 并且不应有影响其进一步使用的损坏, 如螺纹滑牙或紧固件损坏等。

2) 接插件的接线端子结构应保证良好的电接触和预期的载流能力, 应有足够的机械强度。

6.5.4 耐热性能试验、着火危险性能试验、相比漏电起痕指数 (CTI) 测定

分别按本章 3.5.3、3.5.4、3.5.5 规定进行试验。

6.5.5 机械寿命试验

(1) 按本章 3.5.7 规定进行试验。

(2) 试验结果判定:

1) 试验前接插件的接线端子部位温升不得超过 50K, 插接部位的温升不得超过 55K 为合格。

2) 试验后接插件接线端子部位的温升和插接部位的温升不得超过试验前测量值 10K 为合格。

6.5.6 耐老化性能试验

(1) 试验设备: 高温恒温试验箱。

(2) 试验方法及要求:

1) 由橡胶、聚氯乙烯 (PVE) 或类似材料制成的电器的弹性部件 (例如衬垫、密封圈、薄膜和螺旋盖垫) 应放在高温恒温箱内进行试验。除非有关产品标准另有规定, 试验箱内温度为 $70^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

2) 样品应放在试验箱内 10 昼夜 (240h), 试验箱推荐采用电加热方式。

3) 绝缘件经老化试验后, 应放在室温和相对湿度在 45%~55% 的环境中不少于 24h。

(3) 试验结果判定: 老化试验后, 目测样品无变化, 既无表面龟裂或收缩等影响继续使用、又无材料变黏或出油现象为合格。

6.5.7 介电性能试验、耐湿热性能试验

分别按本章 3.5.9、3.5.10 规定进行试验。

6.5.8 温升试验

(1) 试验设备: 低压大电流设备, 温度测试仪。

(2) 试验方法及要求:

1) 温升试验一般在周围空气温度 $+10 \sim +40^{\circ}\text{C}$ 的范围进行, 此时所得出的温升数据无需加以修正。被试接插件应置于实际的抽出式功能单元及相应的安装箱体中进行。如为专用试验箱体, 允许有正常通风。

2) 试验用三相交流 (45~62Hz) 正弦波电源进行, 对电压不作规定。每相电流与各相电流平均值之差不大于 5%。具有中性极的接插件还应补充中性极与其相邻极通以单相电流的温升试验。中性极与其他极同等截面积时通以额定工作电流, 中性极截面积按其他极的 1/2 截面积来选取时, 通以 0.5 倍的额定工作电流。

3) 接插件与电源之间的连接导线应有足够的长度及截面积。

a. 导线截面积 $S \leq 35\text{mm}^2$ 时, 长度不小于 1m。

b. 导线截面积 $S > 35\text{mm}^2$ 时, 长度不小于 2m。

c. 连接导线 (或母排) 的截面积见第 2 章。

d. 对于有中性极的接插件, 如无特殊规定, 中性极的连接导线按 C 选取。

4) 试验从冷态开始, 通以额定工作电流, 试验持续至达到稳定温升为止。连续测温 3 次, 每次间隔 5min, 当任意两次所测温升的变化小于 1K 时, 则认为达到稳定温度。此时测量接插件的温升值。

(3) 试验结果判定: 主电路用接插件的接线端子部位温升不超过 50K, 插接部位的温升不超过 55K 为合格。

参 考 文 献

- [1] 中国实验室国家认可委员会. 实验室认可与管理基础知识. 第1版. 北京: 中国计量出版社出版, 2003.
- [2] GB 7251.1—2005《低压成套开关设备和控制设备第1部分: 型式试验和部分型式试验成套设备(IEC 60439—1: 1999, IDT)》
- [3] GB 7947《导体的颜色或数字标识(idt IEC 60446: 1989)》
- [4] IEC 60073: 1996《指示器和操作装置的颜色编码及其补充意义》
- [5] GB/T 10233—2005《低压成套开关设备和电控设备基本试验方法》
- [6] GB 4824—2004/CISPR11: 2003《工业、科学和医疗(ISM)射频设备电磁骚扰特性 限值和测量方法》
- [7] GB 13539.1《低压熔断器 第1部分: 基本要求(IEC 60269—1, IDT)》
- [8] GB 13539.2《低压熔断器 第2部分: 专职人员使用的熔断器的补充要求(主要用于工业的熔断器)(IEC 60269—2, IDT)》
- [9] GB 13539.3《低压熔断器 第3部分: 非熟练人员使用的熔断器的补充要求(主要用于家用和类似用途的熔断器)标准化熔断器系统示例 A 至 F(idt IEC 60269—3)》
- [10] GB/T 13961—2003《灯具用电源导轨系统安全要求(IEC 60570: 1995, IDT)》
- [11] GB 14048.2—2001《低压开关设备和控制设备 低压断路器(idt IEC 60947—2: 1995)》
- [12] GB/T 18380.3—2001《电缆在火焰条件下的燃烧试验 第3部分: 成束电线或电缆的燃烧试验方法》
- [13] IEC 60909: 1988《三相交流系统短路电流计算》
- [14] ISO 834—1: 1999《耐火试验—建筑结构部件》
- [15] GB/T 2423.44 eqv IEC 60068—2—63: 1991《电工电子产品环境试验 第2部分: 试验方法 试验 Eg: 撞击 弹簧锤》
- [16] GB/T 2423.3 IEC 60068—2—3: 1969《电工电子产品基本环境试验规程 试验 Ca: 恒定湿热试验方法》
- [17] GB/T 5169.10《电工电子产品着火危险试验 试验方法 灼热丝试验方法—总则》
- [18] GB/T 5169.11《电工电子产品着火危险试验 试验方法 成品的灼热丝试验和导则》
- [19] GB/T 2423.5《电工电子产品环境试验 第5部分: 试验方法 试验 Ea 和导则: 冲击(idt IEC 68—2—27: 1987)》
- [20] GB 156《标准电压(neq IEC 38: 19983)》
- [21] GB 4208—2008《外壳防护等级(IP 代码)(idt IEC 60529: 2001)》
- [22] GB 6829《剩余电流动作保护器的一般要求(eqv IEC 755)》
- [23] GB 19212.1《电力变压器、电源装置和类似产品的安全通用要求和试验(IEC 61558—1: 1998)》
- [24] GB 14821.1《建筑物的电气装置 电击防护(eqv IEC 364—4—41: 1992)》
- [25] IEC 309《工业用插头、出线插座和连接器》
- [26] IEC 364—7—704: 1989《建筑物的电气装置—第7部分: 对特殊装置或场地的要求——704 节: 建设和拆除工地的安装》
- [27] GB/T 11918《工业用插头插座和耦合器 第1部分: 通用要求(idt IEC 60309—1)》
- [28] GB/T 11919《工业用插头插座和耦合器 第2部分: 带插销和插套的电器附件的尺寸互换性要求(idt IEC 60309—2)》
- [29] GB 16895.7《建筑物电气装置 第7部分: 特殊装置或场所的要求 第704 节: 施工和拆除场所的电气装置(idt IEC 60364—7—704: 1989)》
- [30] GB 16895.21《建筑物电气装置 第4—41 部分: 安全防护 电击防护(IEC 60364—4—41: 2001, IDT)》
- [31] IEC 60068—2—42: 2003《环境试验 第2—42 部分: 试验—试验 Kc: 接触点和连接件的二氧化硫试验》
- [32] IEC 60364—5—53: 2001《建筑物电气装置 第5—53 部分: 电气设备的选择和安装—隔离、开关和控制》
- [33] IEC 61140: 2001《电击防护—安装和设备的总则》
- [34] IEC 61200—704: 1996《电气安装导则 第704 部分 建造和拆除工地装置》
- [35] IEC 61201: 1992《特低电压(ELV)—限值》
- [36] IEC 61558(所有部分)《电力变压器、电源装置及类似设备安全》
- [37] GB/T 2423.4《电工电子产品基本环境试验规程试验 Db: 交变湿热试验方法(eqv IEC 68—2—30: 1980)》
- [38] GB/T 2423.17《电工电子产品基本环境试验规程 试验 Ka: 盐雾试验方法(eqv IEC 68—2—11: 1981)》
- [39] GB/T 11020《测定固体电气绝缘材料暴露在引燃源后燃烧性能的试验方法(eqv IEC 707: 1981)》
- [40] GB 14821.1《建筑物的电气装置 电击防护(eqv IEC 364—4—41: 1992)》
- [41] IEC 238: 1991《爱迪生螺纹灯座》
- [42] IEC 1238—1: 1993《用于铜或铝导体的电力电缆的压力和机械连接器 第1部分: 试验方法和要求》
- [43] ISO 3231: 1993《色漆和清漆—抗含二氧化硫的湿气性能的测定》
- [44] ISO 4892—2: 1994《塑料——实验室光源照射方法》
- [45] ISO 6506: 1981 金属材料——硬度试验——布氏试验
- [46] ISO 9223: 1992《金属与合成的腐蚀——大气腐蚀——分类等级》
- [47] GB/T 2423.2《电工电子产品环境试验 第2部分: 试验方法 试验 B 高温(idt IEC 60068—2—2: 1974)》
- [48] GB 7251.5《低压成套开关设备和控制设备 第5部分: 对户外公共场所的成套设备—动力配电网用电缆分线箱(CDCs)的特殊要求(idt IEC 60439—5: 1996)》
- [49] GB/T 16422.2《塑料实验室光源暴露试验方法第2部分: 氙弧灯(idt ISO 4892—2: 1994)》
- [50] IEC 60068—2—2: 1994《修订2 环境试验 第2部分: 试验 试验 B 干热》
- [51] IEC 60068—2—75: 1997《环境试验规程 第2部分: 试验—试验 Eh: 锤试验》
- [52] IEC 60695—2—10: 2000《着火危险试验 第2—10 部分: 灼热丝基本试验方法—灼热丝设备和一般试验

程序》

- [53] IEC 60695—2—11: 2000《着火危险试验 第2—11部分: 灼热丝基本试验方法—成品灼热丝可燃性试验方法》
- [54] IEC 60890: 1987《用外推法检查低压成套开关设备和控制设备部分型式试验成套设备(PTTA)的温升及其修订1(1995)》
- [55] IEC 61000—5—7《电磁兼容(EMC) 第5—7部分: 外壳对电磁干扰的防护等级(EM代码)》
- [56] IEC 62262: 2002《电气设备壳体外部机械撞击的防护等级(IK代码)》
- [57] ISO 178: 2001《塑料 弯曲性能的测定》
- [58] ISO 179《(所有部分)塑料 摆锤冲击强度的测定》
- [59] ISO 2409: 1992《附着力(划格法)》
- [60] ISO 11469: 2000《塑料 通用定义与塑料产品标记》
- [61] GB/T 11022《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》
- [62] GB 1094.1《电力变压器 第1部分 总则》
- [63] GB 1094.2《电力变压器 第2部分 温升》
- [64] GB 6450《干式电力变压器》
- [65] GB/T 16935.1《低压系统内绝缘配合第1部分: 原理、要求》
- [66] GB 2423.1《电工电子产品环境试验 第2部分: 试验方法: 试验A低温》
- [67] GB/T 2423.10《电工电子产品环境试验 第2部分: 试验方法: 试验FC和导则 振动(正弦)》
- [68] GB/T 17626.2《电磁兼容 试验和测试技术 静电放电抗扰度试验》
- [69] GB/T 17626.3《电磁兼容 试验和测试技术 射频电磁场辐射抗扰度试验》
- [70] GB/T 17626.4《电磁兼容 试验和测试技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验》
- [71] GB/T 17626.5《电磁兼容 试验和测试技术 浪涌(冲击)抗扰度试验》
- [72] DL/T 5044《火力发电厂、变电所直流系统设计技术规定》
- [73] GB/T 4025《指示灯和按钮的颜色(idt IEC 60073: 1996)》
- [74] GB/T 3797《电气控制设备》
- [75] GB/T 1410《固体绝缘材料体积电阻率和表面电阻率试验方法》
- [76] GB/T 1720《漆膜附着力测定法》
- [77] GB/T 1764《漆膜厚度测定法》
- [78] GB/T 2423.46《电工电子产品环境试验 第2部分: 试验方法 试验Ef: 撞击 摆锤(idt IEC 68—2—62: 1991)》
- [79] GB/T 3880《铝及铝合金轧制板材》
- [80] GB/T 8624《建筑材料燃烧性能分级方法》
- [81] GB/T 10580《固体绝缘材料在试验前和试验时采用的标准条件(eqv ISO 212: 1971)》
- [82] GB/T 11253《碳素钢和低合金结构钢冷轧薄钢板及钢带》
- [83] GB/T 13384《机电产品包装通用技术条件》
- [84] GB/T 15568《通用型片状模塑料(SMC)》
- [85] JB/T 6743《户内户外钢制电缆桥架防腐环境技术要求》
- [86] GB/T 14048.1—2000《低压开关设备与控制设备 总则》